

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE III - PAUL SABATIER  
INSERM U825

## THÈSE

présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur, spécialité  
« Neuropsychologie »

par

Stéphanie IANNUZZI

LES EFFETS LEXICAUX DANS  
L'IDENTIFICATION DE LETTRE : ÉTUDE EN  
POTENTIELS ÉVOQUÉS CHEZ DES ENFANTS  
CONTRÔLES ET DYSLEXIQUES.



## REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit d'un travail de plusieurs années mais elle n'aurait jamais pu voir le jour sans les personnes qui m'ont entourée, soutenue, conseillée et parfois bousculée voire secouée...

## MERCI

- à Jean-François Démonet, mon directeur de DEA et ensuite de thèse pour la confiance et les nombreuses responsabilités qu'il m'a accordées. Il m'a permis d'allier recherche et pratique clinique et d'acquérir une expérience dans ces 2 domaines.
- à François Chollet et Pierre Celsis, directeurs de l'ex-unité 455 pour le premier et de l'actuelle unité 825, de m'avoir accueillie dans leur unité.
- à Philippe Mousty et Sylviane Valdois d'avoir accepté avec enthousiasme de commenter mon travail ainsi qu'à Yves Chaix et Xavier de Boissezon de participer à mon jury de soutenance.
- à Josette qui m'a remonté le moral dans les moments difficiles et conseillée tant d'un point de vue humain que scientifique.
- aux secrétaires sans qui l'unité ne pourrait fonctionner. Merci à Irène pour sa rigueur, ses conversations, ses conseils et astuces. Merci aussi à Martine qui l'a succédée et qui a répondu au plus vite à mes nombreuses demandes.
- à Yves Chaix (encore) et toute l'équipe de l'hôpital des enfants qui m'ont permis de garder un pied en clinique et de poursuivre mes expériences dans ce domaine. C'est avec regrets que j'ai laissé ce poste pour partir à Paris.
- à Franck Ramus de m'avoir accueillie à Paris et pour ses nombreux enseignements.
- à certains enseignants croisés durant mes études. Je pense particulièrement à Monsieur Junca de Morais qui m'a fait découvrir la psycholinguistique, à

Monsieur Féry, directeur de mon mémoire de licences qui m'a fait aimé la recherche et donné envie de poursuivre dans cette voie.

- à mes parents qui nous ont inculqué les valeurs nécessaires pour mener à bien nos projets. Merci aussi pour leur soutien moral et financier malgré mes choix qu'ils n'approuvaient pas toujours. Une petite question subsiste cependant : « Pourquoi Stéphane et Stéphanie ? ». Ce qui me permet de rebondir sur une autre personne à remercier :
- Mon frère. Tu as parfaitement joué ton rôle de grand frère : protéger, encourager, stimuler mais aussi secouer, conseiller et montrer l'exemple.
- de façon plus large, à ma famille et belle-famille.
- mes amis belges. L'adage dit « loin des yeux, loin du cœur », mais mes amis permettent de le démentir. Plus précisément, merci à Sara avec qui il est toujours bon de ragoter, une canette de coca-light à la main. Merci à Stéphane qui trouve du temps même après une garde pour partager un repas et à Fanny de partager ces moments. Merci à Elodie, Isa, Julie et Barbara pour nos réunions neuropsychologie et la création de l'association et aux deux premières pour nos week-end annuel (à quand le prochain ?). Merci à Frédérique et son oreille attentive.
- à mes collègues. Ceux qui ont partagé mon bureau : Chantal, Mélanie (un merci tout spécial pour la collaboration fructueuse), Sébastien T., Olivier, Nathalie, Hélène et Déborah (que je remercie aussi pour tous les bons moments passés et j'espère futurs). Ceux qu'on retrouvait pour manger : Maria, Sébastien S. (vive les traitements EEG), les 2 Laure, les 2 Estelle, les 2 Perrine, les 2 Evelyne, Caroline, Elodie, Rodolphe (que je remercie aussi surtout pour la passation des EEG), Jérôme, Pierre-Edouard, Mélanie P.,...
- à Julien pour tout (la liste serait beaucoup trop longue), d'être là près de moi. Merci aussi pour les bons petits plats et le soutien latex :-)

Et merci à tous les enfants et leurs parents qui ont accepté de donner de leur temps pour faire avancer la recherche et qui ont montré de l'intérêt pour les études que je menais.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>13</b>
<b>I</b>	<b>Etat de l’art</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>LES MÉCANISMES DE LECTURE</b>	<b>17</b>
2.1	INTRODUCTION . . . . .	17
2.2	QU’ENTEND-T-ON PAR « LIRE » ? . . . . .	18
2.3	LE TRAITEMENT DES MOTS ÉCRITS : DE LA PERCEPTION À L’ACCÈS LEXICAL	19
2.3.1	La forme globale des mots . . . . .	19
2.3.2	Les traits visuels des lettres . . . . .	21
2.3.3	Le codage des lettres et de leur position . . . . .	23
2.3.4	Les mouvements oculaires . . . . .	27
2.3.5	La position optimale du regard (the Optimal Viewing Position) . .	32
2.3.6	L’effet de supériorité du mot (Word Superiority Effect : WSE) . . . .	35
2.4	L’IDENTIFICATION DES MOTS ÉCRITS . . . . .	38
2.4.1	Les modèles de lecture experte . . . . .	38
2.4.2	Aspects neurolinguistiques du langage . . . . .	49
2.4.3	Conclusion . . . . .	74
<b>3</b>	<b>LA LECTURE : DÉVELOPPEMENT NORMAL ET PATHOLOGIQUE</b>	<b>75</b>
3.1	L’APPRENTISSAGE DU LANGAGE ÉCRIT . . . . .	76
3.1.1	Les étapes d’acquisition du langage écrit . . . . .	76
3.1.2	Le rôle de la conscience phonologique dans l’acquisition du langage écrit . . . . .	80
3.2	LA DYSLEXIE DE DÉVELOPPEMENT. . . . .	81
3.2.1	Définition . . . . .	82
3.2.2	Les sous-types de dyslexie . . . . .	83
3.2.3	Les troubles associés. . . . .	86
3.2.4	Les théories explicatives de la dyslexie . . . . .	90

3.2.5	Les origines neuro-biologiques . . . . .	107
3.2.6	Les origines génétiques . . . . .	111
3.3	LA NEUROFIBROMATOSE DE TYPE I (NF1) . . . . .	115
3.3.1	Définition . . . . .	115
3.3.2	Les difficultés d'apprentissage . . . . .	117
3.4	SYNTHÈSE . . . . .	120

## **II Données expérimentales 121**

### **4 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE 123**

4.1	L'EFFET DE SUPÉRIORITÉ DU MOT : DÉVELOPPEMENT NORMAL ET PATHOLOGIQUE . . . . .	124
4.2	L'EFFET DE POSITION DU REGARD . . . . .	125
4.3	LE MASQUAGE LATÉRAL . . . . .	126
4.4	LES EFFETS « TOP-DOWN » LEXICAUX SUR LA RECONNAISSANCE DE MOTS ISOLÉS . . . . .	127
4.4.1	Effet de position du regard . . . . .	128
4.4.2	Effets « top-down » lexicaux et dyslexie . . . . .	130
4.5	PROBLÉMATIQUE . . . . .	130

### **5 MATÉRIEL ET MÉTHODE 131**

5.1	LES POTENTIELS ÉVOQUÉS . . . . .	131
5.1.1	Enregistrement des potentiels évoqués . . . . .	131
5.1.2	Traitement du signal . . . . .	134
5.1.3	Analyses statistiques . . . . .	136

### **6 PREMIÈRE EXPÉRIENCE 139**

6.1	PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE . . . . .	139
6.1.1	Hypothèses . . . . .	139
6.1.2	Méthodologie . . . . .	140
6.2	RÉSULTATS . . . . .	145
6.2.1	Résultats comportementaux . . . . .	146
6.2.2	Résultats des potentiels évoqués . . . . .	148
6.3	DISCUSSION . . . . .	155
6.3.1	Données comportementales . . . . .	155
6.3.2	Potentils évoqués . . . . .	159

<b>7</b>	<b>DEUXIÈME EXPÉRIENCE</b>	<b>165</b>
7.1	PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE . . . . .	165
7.1.1	Hypothèses . . . . .	165
7.1.2	Méthodologie . . . . .	166
7.2	RÉSULTATS . . . . .	167
7.2.1	Analyses comportementales . . . . .	167
7.2.2	Résultats des potentiels évoqués : 101 ms . . . . .	169
7.2.3	Résultats des potentiels évoqués : effet du temps de présentation . . . . .	174
7.3	DISCUSSION . . . . .	180
7.3.1	Données comportementales . . . . .	180
7.3.2	Potentiels évoqués . . . . .	181
<b>8</b>	<b>DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>185</b>
<b>A</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>227</b>
A.1	LISTE DE STIMULI . . . . .	229
A.2	RÉSULTATS DES ANALYSES DE RÉGRESSIONS . . . . .	230
A.2.1	Analyses de régression sur les pourcentages de bonnes réponses . . . . .	230
A.2.2	Analyses de régression sur les temps de réaction . . . . .	230
A.3	ARTICLE : BEHAVIOURAL AND COGNITIVE PHENOTYPES IN CHILDREN WITH NEUROFIBROMATOSIS TYPE 1 (NF1) : THE LINK WITH THE NEURO- BIOLOGICAL LEVEL . . . . .	231

## LISTE DES FIGURES

2.1	la forme globale du mot « question » . . . . .	19
2.2	Modèle du pandemonium de Selfridge et Neisser (1960) . . . . .	22
2.3	Représentation d'une activation de la lettre « T » en première position d'un mot et ses interconnexions selon le modèle IAM (McClelland et Rumelhart 1981) . . . . .	24
2.4	Exemples de fixations (○), de saccades (→) et de régressions (←) au cours de la lecture d'un texte (d'après O'Regan et Lévy-Schoen (1978)). Les valeurs correspondent aux durées de fixations en ms. . . . .	30

2.5	Paradigme de choix forcé mis au point par Reicher (1969) et Wheeler (1970) . . . . .	35
2.6	Modèle de la lecture selon Morton et Patterson (1980) . . . . .	39
2.7	Modèle de lecture à double voie selon Coltheart et coll. (1980) . . . .	40
2.8	Modèle double-voie à traitement en cascade (Coltheart et coll. 2001)	42
2.9	Modèle connexionniste à deux processus(CDP+) de Perry et coll. (2007)	47
2.10	Principales aires cérébrales du langage situées dans l'hémisphère gauche . . . . .	52
2.11	Principaux composants des potentiels évoqués . . . . .	56
2.12	Dispositif de magnéoencéphalographie . . . . .	56
2.13	Vue axiale d'un cerveau par topographie à émissions de positons . .	57
2.14	Activations cérébrales observées à partir de la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle . . . . .	58
3.1	Constellation des troubles associés à la dyslexie . . . . .	89
3.2	Modélisation des facteurs causaux de la dyslexie . . . . .	113
4.1	Schéma des processus de traitement visuel du mot « MON » . . . . .	127
5.1	Répartition des 19 électrodes standards selon le système « 10-20 international » . . . . .	132
5.2	Répartition des électrodes sur un bonnet à 32 voies . . . . .	132
5.3	Visualisation des Potentiels Evoqués . . . . .	136
6.1	(A) Localisation des stimuli sur l'écran, centré sur la première, la deuxième, la troisième, la quatrième ou la cinquième lettre. (B) Paradigme expérimental de la tâche de Reicher-Wheeler . . . . .	143
6.2	Pourcentages moyens de bonnes réponses à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques . . . . .	146
6.3	Moyennes des temps de réaction à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques . . . . .	147
6.4	Interaction entre position et hémisphère pour la latence de P1 . . . .	154



7.1	Pourcentages moyens de bonnes réponses à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques pour un temps de présentation de 101 ms . . . . .	168
7.2	Temps de réaction moyens à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques pour un temps de présentation de 101 ms . .	168
7.3	Interaction entre le groupe et la lexicalité . . . . .	169
7.4	Interaction entre le groupe et la position . . . . .	170

## Liste des tableaux

6.1	Caractéristiques de genre et d'âge (moy= moyenne et ET = écart-type) des sujets ayant participé à notre étude. . . . .	141
6.2	Événement P1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	149
6.3	Événement N1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	150
6.4	Événement N2 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	152
6.5	Événement P300 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	153
7.1	Caractéristiques de genre et d'âge (moy= moyenne et ET = écart-type) des sujets ayant participé à la seconde expérience. . . . .	166
7.2	Événement P1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	171

7.3	Événement N1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	172
7.4	Événement N2 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	173
7.5	Événement P300 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet . . . . .	174
7.6	Événement P1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet . . . . .	175
7.7	Événement N1 : résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet . . . . .	177
7.8	Événement N2 : résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet . . . . .	178
7.9	Événement P300 : résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet . . . . .	179





# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Redoublement, soutien scolaire, PAI<sup>1</sup>, PPRE<sup>2</sup>, AVS<sup>3</sup>... Voici un infime échantillon des solutions proposées en France pour remédier à l'échec scolaire. Ceci illustre bien que les difficultés d'apprentissage sont un réel phénomène de société auquel politiciens, pédagogues, neurologues, psychologues, orthophonistes, chercheurs et enseignants tentent de remédier. La question est rendue complexe en partie par les causes multiples de l'échec scolaire. Parmi celles-ci, les troubles spécifiques des apprentissages font l'objet de nombreuses études mais restent méconnus par certains aspects.

L'un des apprentissages fondamentaux à l'école primaire concerne la lecture. Cette activité automatique à l'âge adulte nécessite une instruction plus ou moins longue en fonction des enfants, de la langue, de la méthode, etc. Bien que cet apprentissage se fasse souvent sans trop de heurts, certains enfants rencontrent d'importantes et persistantes difficultés. Le trouble spécifique d'apprentissage de la lecture, appelé dyslexie, est fréquent (6 à 8 % de petits français) et son étude a permis d'avancer dans la compréhension des processus de lecture.

De nombreuses études se sont intéressées d'une part aux mécanismes mis en place pour l'identification de mots écrits et d'autre part à la manière dont la lecture s'acquiert chez les enfants. Notre travail s'inscrit dans ce cadre général puisqu'il concerne l'influence lexicale dans l'identification de la lettre chez des enfants. On

---

1. Projet d'Accueil Individualisé  
2. Programme Personnalisé de réussite éducative  
3. Auxiliaire de Vie Scolaire

cherchera à mettre en évidence à quel stade de traitement les connaissances lexicales interviennent grâce à la technique des potentiels évoqués. Cette étude portera à la fois sur des enfants normo-lecteurs et, dans une approche plus neuropsychologique, sur des enfants souffrant de dyslexie de développement.

La première partie de ce manuscrit sera consacré à l'état des connaissances actuelles sur les mécanismes, l'apprentissage et les troubles de la lecture. Dans un second temps, nous exposerons les recherches réalisées durant ces 4 années de thèse au sein de l'unité 825. Nous préciserons le cadre de travail avant de présenter spécifiquement les études en électro-encéphalographie de l'influence des connaissances lexicales sur l'identification de lettres.

# **Première partie**

## **Etat de l'art**





# LES MÉCANISMES DE LECTURE

# 2

## 2.1 INTRODUCTION

Dans notre société, la lecture est une activité courante et quotidienne. Ce mode de communication a pris de l'ampleur durant le siècle dernier et il est maintenant souvent indispensable de le maîtriser pour pouvoir accéder à certaines informations primordiales telles que le descriptif de produits lors des courses, les notices de médicaments, les modes d'emploi de certains appareils, les horaires dans les gares et les aéroports, etc. Pour le lecteur expert, cette fonction est simple, immédiate et automatique. Elle ne demande pas d'effort apparent, nous ne devons pas consciemment réfléchir à la manière dont elle s'effectue. Pourtant, contrairement au langage parlé, la lecture n'est pas naturelle et n'est apparue que récemment (il y a 6000 ans tout de même). De plus, toutes les sociétés humaines ne l'ont pas développée. Nous nous rendons également compte que l'apprentissage de la lecture n'est pas chose aisée puisqu'il nécessite plusieurs mois voire plusieurs années et ne peut se faire par seule confrontation à des textes écrits.

Dans cette première partie, nous tenterons de définir plus précisément ce que l'on entend par « lecture », nous verrons que ce terme peut avoir des sens très distincts et regrouper diverses réalités. Nous verrons ensuite quels sont les mécanismes de cette activité cognitive, quelles sont les étapes de traitement de l'information permettant d'y parvenir. Nous aborderons également la manière dont ces mécanismes se mettent en place lors de l'apprentissage. Précisons que nous ne traiterons dans

ce travail que de la lecture alphabétique. Nous n'évoquerons pas la spécificité des langues logographiques tels que le chinois ou le japonais kanji ni la lecture du braille, spécifique par sa séquentialité.

## 2.2 QU'ENTEND-T-ON PAR « LIRE » ?

« Lire sur les lèvres », « Lire une partition », « Lire en quelqu'un comme dans un livre ouvert », « Lire entre les lignes »... Autant d'expressions utilisant le terme « lire » mais qui expriment des réalités bien différentes. Lors d'une conférence sur la lecture au milieu du siècle dernier, Spencer (cité par Morais (1994) propose que « dans son sens le plus large, la lecture est le processus d'interprétation des stimuli sensoriels ». Morais (1994) s'insurge contre cette définition qui serait plus adaptée au terme de perception qu'à celui de lecture. En effet, dans le cadre scientifique de l'étude de la lecture, nous ne pouvons accepter le point de vue élargi, il est indispensable de restreindre le champ d'application de notre objet d'étude à l'interprétation de signes graphiques. Au vu de ces éléments, l'activité de lecture peut se définir comme la capacité de reconnaissance, c'est-à-dire la capacité d'identifier chaque mot en tant que forme orthographique ayant une signification et de lui attribuer une prononciation. Par ailleurs, dans le terme « lecture », plusieurs concepts sont confondus... Tel qu'utilisé actuellement, il recouvre à la fois la capacité de lecture, les buts de la lecture, l'activité de lecture et la performance de lecture. La performance de lecture est le résultat, le degré de réussite de l'activité de lecture. L'activité de lecture est l'ensemble des événements qui se déroulent dans le cerveau et dans le système cognitif que le cerveau supporte, ainsi que dans les organes sensoriels et moteurs. Les buts de la lecture sont la compréhension du texte écrit et/ou l'atteinte d'une impression de beauté. La capacité de lecture est la partie de l'ensemble des ressources que nous mobilisons en lisant et qui est spécifique à l'activité de lecture (i.e. qui n'est pas mise en jeu dans les autres activités). Cette capacité peut également être définie comme l'ensemble des processus perceptifs permettant que la forme physique du signal graphique ne soit plus un obstacle à la compréhension du message écrit. Comme toute autre capacité cognitive, la capacité de lecture est une transformation de représentations dites d'entrée en d'autres représentations dites de sortie. Dans ce cas, la représentation d'entrée est un patron visuel et celle de sortie est une représentation phonologique

(Morais 1994).

Lire consiste donc dans un premier temps à traiter une information visuelle. Dès la fin du 19<sup>ième</sup> siècle, de nombreux auteurs se sont attachés à comprendre la nature et le mode d'organisation des représentations visuelles et orthographiques en présence d'un mot écrit. Deux types d'informations visuelles/orthographiques ont été proposés pour rendre compte de la lecture. La première concernerait plutôt une forme globale du mot (Cattell 1886, Johnson 1977, Haber et coll. 1983, Monk et Hulme 1983, Healy et Cunningham 1992) ou l'ensemble des traits visuels qui le compose et lui donne une configuration spécifique (Smith 1969, Wheeler 1970, Allen et coll. 1995) tandis que la seconde correspondrait à l'identité abstraite des lettres (Adams 1979, McClelland 1976, McClelland et Rumelhart 1981, Paap et coll. 1982; 1984).

## 2.3 LE TRAITEMENT DES MOTS ÉCRITS : DE LA PERCEPTION À L'ACCÈS LEXICAL

### 2.3.1 La forme globale des mots

La forme globale du mot correspond à son « enveloppe » visuelle lorsqu'il est écrit en minuscule. En effet, certaines lettres sont montantes (b,d,f,h,k,l,t), d'autres sont descendantes (g,j,p,q,y) et d'autres encore sont dites neutres (a,c,e,i,m,n,o,r,s,u,v,w,x,z). Les mots présentent donc une forme globale très différente en fonction du nombre de lettres montantes, descendantes ou neutres qui le composent. Si nous prenons comme exemple le mot « question » dont l'ombre est présentée à la figure 2.1, nous constatons qu'il débute par une lettre descendante suivie de 3 lettres neutres, viennent ensuite une lettre montante et 3 lettres neutres.



FIGURE 2.1 – la forme globale du mot « question »

Toutefois, toutes ces informations ne se retrouvent pas lorsque les mots sont écrits en MAJUSCULES. Plusieurs arguments ont été proposés en faveur de l'hypothèse d'un traitement de la forme globale du mot. Ainsi, le fait que les lecteurs soient plus lents lorsque les mots sont présentés en MAJUSCULES ou en alternance mInUsCuLeS-mAjUsCuLeS a été avancé comme preuve de l'importance de la forme globale du mot. Cependant, nous nous rendons aisément compte que cet effet en défaveur des MAJUSCULES peut refléter uniquement l'habitude du lecteur qui est plus souvent confronté à du texte écrit en minuscule et est donc plus habile pour lire ce genre de texte. Concernant les mots qui alternent les 2 casses, ils seraient plus difficiles à décoder par le fait que la discriminabilité des lettres est altérée et que le degré d'incertitude du stimulus est augmenté (Ferrand 2007). Des expériences de détection d'erreurs en lecture de texte ont également été proposées pour mettre en évidence l'importance de la forme globale. Monk et Hulme (1983) et Healy et Cunningham (1992) ont constaté que des erreurs étaient plus facilement décelées quand la lettre substituée ne permettait pas de conserver la forme globale du mot. Il est plus difficile de s'apercevoir de l'erreur lorsque le mot « question » est substitué par « quesfion » que s'il est remplacé par « quescion ». Paap et coll. (1984) ont proposé que cet effet ne devait pas être considéré comme lié à la forme globale du mot mais peut-être plutôt localisé au niveau des lettres. Ces dernières seraient moins discriminables lorsque la lettre de substitution maintient l'enveloppe du mot. Plusieurs expériences ont alors été réalisées et ont permis d'infirmer l'hypothèse d'une place prépondérante de la forme globale du mot pour la lecture. En détection d'erreurs, par exemple, Paap et coll. (1984) ont mis en évidence que les fautes étaient mieux discriminées quand la lettre substituée était similaire visuellement et ce, que la forme globale du mot soit respectée ou non. Dans une expérience d'identification de mots écrits, les mêmes auteurs ont posé l'hypothèse que si la forme globale avait un rôle important, les mots ayant une forme rare devraient être lus plus rapidement. Or, il ne trouve pas de différence significative entre les mots à la forme globale rare et ceux qui ont une forme fréquente et ce, quelle que soit la fréquence d'occurrence des mots. D'autres chercheurs (Mayall et coll. 1997, Mayall et Humphreys 1996) ont montré que les difficultés de lecture en situation aLtErNéE ne s'explique pas par la distorsion de la forme globale du mot mais plutôt par un groupement inapproprié des lettres. Pour le mot « tAbLe », par exemple, le « A » serait groupé au « b » et ils formeraient ainsi une unité non appropriée de lecture. Leur expérience consistait en l'identification de mots présentés en minuscules ou en casses aLtErNéEs et

avec ou sans espacement entre les lettres. Ils obtiennent un effet de l'espacement uniquement pour la casse iNhAbItUeLlE et bien entendu un effet de la casse. Si la forme globale du mot était la principale information visuelle nécessaire à l'identification du mot, l'effet de l'espacement aurait été observé aussi pour les lettres minuscules. Bien que ces résultats suggèrent que la forme globale n'est pas en jeu dans la lecture, certains auteurs (Allen et coll. 1995, Healy et Cunningham 1992, Lété et Pynte 2003) continuent à soutenir une hypothèse holistique de la lecture.

### 2.3.2 Les traits visuels des lettres

Nous venons de voir que l'information visuelle nécessaire à la lecture ne serait pas la forme globale des mots mais plutôt les lettres. Il est assez intuitif de se dire que pour identifier un mot, il faut identifier les lettres qui le composent. Mais comment reconnaît-on les lettres ? La toute première information extraite lors de la présentation d'un stimulus porte sur ses propriétés purement physiques. Il faut dans un premier temps enregistrer si le stimulus se compose de lignes droites, courbes, verticales, horizontales, obliques, longues ou courtes, plus ou moins espacées. Ce travail d'analyse n'est pas spécifique à l'identification de mots, il s'effectue pour d'autres stimuli visuels. Toutefois, cette analyse purement visuelle des lettres est totalement insuffisante pour permettre d'identifier le mot qu'elles composent. En effet, une même lettre peut diverger très fortement quant à son aspect physique. Elle peut être écrite en MAJUSCULES ou en minuscules, dans des polices différentes ou, pour les lettres manuscrites, diverger en fonction de la grande diversité des calligraphies individuelles. Malgré cette variété, les systèmes d'écriture alphabétiques peuvent être décrits grâce à un ensemble limité de traits (lignes horizontales, verticales, courbes ouvertes ou fermées, etc). En utilisant moins de 10 traits caractéristiques, Selfridge et Neisser (1960) ont proposé le premier modèle d'analyse des traits visuels des lettres appelé le « pandémonium » (cf figure 2.2). Ce modèle se compose de plusieurs groupes de décodeurs (appelés démons par les auteurs). Le premier groupe, les démons « image » ont pour fonction d'enregistrer l'image iconique de la lettre. Celle-ci est ensuite analysée par les « Line demons » (démons lignes) et les « angle demons » (démons angles) en fonction des différents traits composant la lettre. Suite à cela, toutes les lettres comportant ces mêmes traits sont activées au niveau des « pattern demons » (démons de modèles) et ce de façon proportionnelle. Ainsi, plus les traits observés sont consistants avec une

lettre, plus celle-ci est activée. Et finalement, un système décisionnel (« decision demons ») choisit simplement la lettre la plus activée.

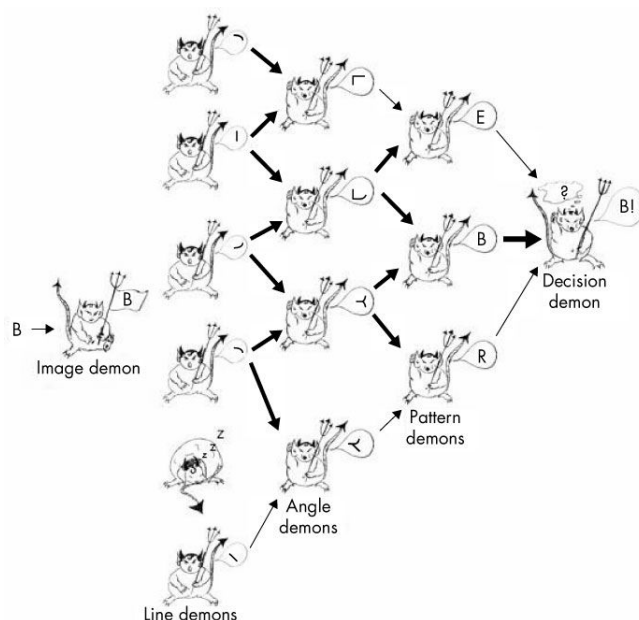


FIGURE 2.2 – Modèle du pandemonium de Selfridge et Neisser (1960)

Les principaux modèles théoriques qui ont fait suite au pandémonium s'accordent sur le fait que la reconnaissance visuelle des mots écrits se fait en 3 étapes (Caramazza et Hillis 1990, McClelland et Rumelhart 1981, Paap et coll. 1982). Dans un premier temps, un traitement des caractéristiques du trait visuel des lettres est réalisé et permet une computation des points, orientations, etc. Une seconde étape consiste en la reconstruction des lettres à partir des caractéristiques précédemment encodées. Cette phase de traitement permettrait de distinguer les items alphabétiques des stimuli non alphabétiques à un niveau pré-lexical. Finalement, dans la dernière étape, les mots sont traités et une forme abstraite est créée à partir de l'identité de chaque lettre (représentation abstraite de chaque lettre, indépendante de la casse, police, etc.).

### 2.3.2.1 Le modèle activation-vérification (Paap et coll. 1982)

Selon le modèle à activation-vérification (AV) de Paap et coll. (1982), il y aurait des unités « lettres » stockées dans un alphabet mental et des unités « mots » stockées dans un lexique mental. Chaque lettre de l'alphabet est représentée par une liste de traits visuels et le niveau d'activation d'une lettre est déterminé par le

nombre de traits appariés et non appariés qui ont été détectés. Les unités de mots quant à elles, sont activées par extension en fonction de l'activation des lettres qui le constituent. Le modèle prévoit également la possibilité qu'une détection de traits au-delà de la lettre (ex : la longueur ou la forme globale du mot) puisse contribuer à l'activation des unités « mots ». Cette première étape d'activation conduit à la sélection d'un petit ensemble de candidats lexicaux composé de l'item (ex : le mot « lien ») en question mais également de ses voisins lexicaux (ex : « lion », « sien », « tien », « liés », ...). La seconde étape, dite de vérification, va consister à comparer successivement chaque unité activée à la représentation du stimulus et ce, par ordre décroissant de fréquence d'occurrence. Une décision est prise pour chaque candidat jusqu'à ce que le critère de décision soit atteint pour l'un des mots préalablement activé.

### 2.3.3 Le codage des lettres et de leur position

Comme nous venons de le voir, aujourd'hui la plupart des auteurs s'accordent sur le fait que la lettre est l'unité de base de la perception des mots écrits (McClelland et Rumelhart 1981, Paap et coll. 1982, Grainger et Jacobs 1996, Bowers 2000). De même, nombreux sont ceux qui pensent que pour pouvoir reconnaître la lettre quelques soient la police et la casse utilisées, il faut qu'il existe un système qui possède la connaissance de l'identité abstraite des lettres (Morais 1994).

Par ailleurs, outre l'identité des lettres, leur position est également importante pour pouvoir identifier un mot dans des langues alphabétiques (tels que le français, l'anglais ou l'allemand) qui possèdent beaucoup d'anagrammes (ex : « maison » et « aimons »). Ferrand (2007) reprend 3 hypothèses envisagées pour rendre compte du codage des lettres et de leur position :

#### 2.3.3.1 Le codage par slot

Le codage par slot consiste en un codage simultané de l'identité de la lettre et de sa position. Chaque lettre est indexée à un emplacement donné dans la suite de lettres. *Le modèle à activation interactive (IAM)* de McClelland et Rumelhart (1981) est un exemple de ce type de codage (voir figure 2.3). Selon ce modèle, les 3 niveaux de traitement (traits visuels, lettres et mots) opèrent entièrement en parallèle. La reconnaissance d'un mot serait influencée à la fois par des informations de bas

niveau (celui des lettres) et par des informations de plus haut niveau (celui des mots). Les différentes unités sont interconnectées au sein d'un même niveau mais également entre les niveaux adjacents. Les connexions peuvent être excitatrices entre 2 unités compatibles ou inhibitrices entre 2 unités incompatibles. Dans ce modèle, les suites de lettres sont codées en parallèle par un ensemble de détecteurs de lettres dépendant de la position de la lettre dans le mot et de la longueur de ce dernier. Ainsi, il existe des unités différentes pour la lettre « R » dans le mot de 5 lettres « ROBOT » (où elle se situe en première position), dans le mot de cinq lettres « ARMEE » (où elle se situe en deuxième position) et dans le mot de sept lettres « RAVIOLI » (où elle se situe en première position). Ce type de codage de la position des lettres est le plus efficace mais est particulièrement coûteux puisqu'il faut dupliquer de nombreuses fois l'ensemble des lettres de l'alphabet afin de pouvoir coder toutes les positions de suites de lettres en fonction de la longueur du mot. De plus, cela code l'information absolue et non relative de la position des lettres (Ferrand 2007)

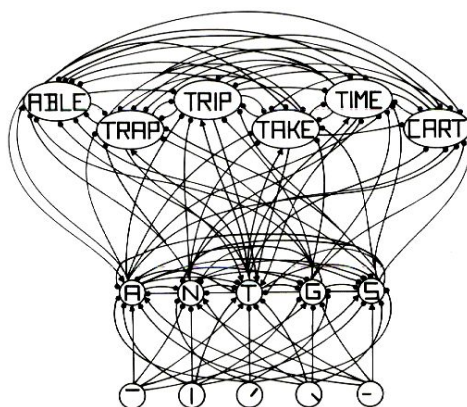


FIGURE 2.3 – Représentation d'une activation de la lettre « T » en première position d'un mot et ses interconnexions selon le modèle IAM (McClelland et Rumelhart 1981)

Pour pouvoir coder la position relative des lettres, une solution consiste à ajouter des points d'ancrage. La position d'une lettre sera alors définie par rapport à un point d'ancrage donné. Dans leur *modèle à 2 routes*, Coltheart et coll. (2001) proposent un codage de gauche à droite indépendant de la longueur du mot. La position d'une lettre est codée par rapport au début du mot, de sorte que la 3<sup>ème</sup> lettre d'un mot est codée à la même position pour un item de 4 lettres que pour un item de 7 lettres. Ceci permet donc de considérer des mots de différentes longueurs. En 1999, Peressotti et Grainger (1999) ont envisagé une extension à ce



type de codage en suggérant que le système visuel doit utiliser la position de la fixation de l'oeil comme point d'ancrage en plus des deux autres, correspondant à la première et la dernière lettres du mot. Selon leur conception, le codage relatif de la position opérerait autour de 3 points d'ancrage : les 2 lettres extrêmes et la position de l'oeil dans le mot (généralement plus centrale). Le système visuel dispose donc d'informations concernant les lettres externes et les lettres situées au centre mais peu d'information sur les autres lettres (Stevens et Grainger 2003). Les espaces inter-mots permettent non seulement de diminuer l'inhibition latérale, mais également de donner une information précieuse quant à la position des lettres externes. Les lettres fixées bénéficient quant à elles d'une bonne acuité grâce à leur projection au centre de la fovéa, région dense en cônes, ainsi que de la correspondance rétinotopique de l'information à droite et à gauche du point de fixation permettant d'inférer la position des lettres par rapport à ce point.

Ferrand (2007) ajoute que dans les modèles computationnels de la lecture à voix haute (Plaut et coll. 1996), un autre type de codage par slot a été utilisé pour les mots monosyllabiques avec la définition de 3 positions : l'attaque, le noyau vocalique et la coda. Ce type de codage ne permet toutefois pas d'expliquer pourquoi le lecteur ne confond pas « RTAIN » et « TRAIN ».

La deuxième sorte de codage est appelé *codage dépendant du contexte local* et utilise le concept de « triplets » de lettres (Seidenberg et McClelland 1989). Dans le mot « ROBOT » par exemple, le codage s'effectue comme en ensemble non ordonné de triplets de lettres : #RO/ROB/OBO/BOT/OT# où # représente un espace. Le contexte local est donc calculé par les triplets de lettres mais ne l'est que pour les lettres adjacentes. Dans son modèle *Blirnet*, Mozer (1987) a proposé un système de triplets plus élaboré car rendu plus flexible par l'utilisation de « trigrammes ouverts ». Ces derniers peuvent être formés en insérant une lettre entre la 1<sup>ière</sup> et la 2<sup>ième</sup> lettre ou entre la 2<sup>ième</sup> et la 3<sup>ième</sup> lettre de chaque triplet. Ainsi, si nous reprenons notre exemple, le mot « ROBOT » contient les 5 triplets déjà présentés mais aussi des trigrammes ouverts tels que R\_OB et RO\_B. Plus récemment, cette idée d'un codage de la position relative des lettres a été reprise par Grainger et Van Heuven (2003) qui ont utilisé des bigrammes ouverts pour coder la position des lettres dans un mot. Les bigrammes sont formés à partir des lettres adjacentes ou non adjacentes dans l'ordre correct. Le mot « LOUP » est ainsi

codé : LO/LU/LP/OU/OP/UP. Ce modèle s'inspire de celui de Mozer (1987) par son mécanisme d'activation hiérarchique et en parallèle.

Le troisième type de codage des lettres et de leur position est appelé codage spatial et est utilisé dans les modèles SERIOL (Whitney 2001) et SOLAR (Davis et Bowers 2006). Dans ce type de modèle, la position relative des lettres distribuées spatialement est codée selon les niveaux d'activation relatifs. Ceci n'est efficace que lorsque les lettres forment un ensemble de valeurs d'activations augmentant (ou diminuant) de façon monotone, ce qui réfère à la notion de gradient d'activation. Concernant le codage de la position des lettres, ce gradient d'activation forme une fonction monotone d'activation décroissante à travers la position des lettres, avec la valeur la plus élevée pour les lettres aux premières positions et la plus basse pour la lettre finale.

### 2.3.3.2 L'effet du nombre de lettres

Un autre aspect important ayant trait aux lettres et influençant la reconnaissance d'un mot écrit concerne le nombre de lettres qui composent ce mot. De nombreuses études se sont attardées sur cette question et les résultats divergent. Cette disparité est due au fait que la mesure orthographique du nombre de lettres est très corrélée à des mesures phonologiques de nombres de syllabes et de phonèmes, elles-mêmes en lien avec d'autres variables telles que le nombre de voisins orthographiques et la fréquence d'occurrence (Ferrand 2007). Pour tenter d'affiner les recherches dans ce domaine, New et coll. (2006) ont ré-analysé un volumineux corpus de données de temps de réaction dans une tâche de décision lexicale. Leur étude portait sur plus de 33000 mots anglais longs de 3 à 13 lettres. Le profil des résultats est surprenant avec une courbe en forme de U. Un effet de facilitation de la longueur est observé pour les mots de 3 à 5 lettres, ces derniers étant reconnus plus facilement. Il n'y a pas de différence significative pour les mots de 5 à 8 lettres, tandis qu'un effet inhibiteur est mis en évidence pour les items de plus de 8 lettres, avec des mots de 9 lettres plus rapidement reconnus que ceux de 10 lettres, eux-mêmes plus vite reconnus que ceux de 11, etc. A l'heure actuelle, aucun modèle de lecture silencieuse n'est parvenu à rendre compte de ces effets puisqu'ils prédisent soit un effet de facilitation du nombre de lettres (McClelland et Rumelhart 1981, Grainger et Jacobs 1996), soit un effet d'inhibition (Coltheart et coll. 2001). Précisons toutefois que ces effets du nombre de lettres semblent robustes et indépendants de

la fréquence lexicale, du nombre de syllabes, du nombre de voisins, de la structure du mot (mono-ou polymorphémiques), du nombre de syllabes et de la classe grammaticale (noms ou verbes).

#### 2.3.4 Les mouvements oculaires

*« Si nous nous asseyons en face de quelqu'un qui est en train de lire et regardons ses yeux de près ; ou, ce qui est plus approprié, s'il tient un miroir couché sur la page d'à côté au fur et à mesure qu'il lit pendant que nous regardons par-dessus son épaule, nous remarquerons que ses yeux se déplacent bien régulièrement d'un côté à l'autre le long des lignes imprimés. »*

Ce passage, extrait du livre de Huey (1908) : « la psychologie et la pédagogie de la lecture », met bien en évidence le fait que durant l'activité de lecture, les yeux sont en mouvement perpétuel. Ces mouvements ont été étudiés dès 1879 par Javal (1879) qui a utilisé une technique astucieuse pour l'époque : il a percé des trous dans un journal et a observé le comportement des yeux d'un lecteur. Depuis cette époque, les techniques n'ont cessé d'évoluer et différentes méthodes permettent aujourd'hui d'enregistrer les mouvements oculaires. L'électro-oculographie est l'une de ces mesures qui consiste à enregistrer les modulations des potentiels recueillis sur les deux tempes des sujets, c'est-à-dire de part et d'autre des yeux. Lorsque ces derniers tournent dans leur orbite, on observe une modification de l'équilibre de ces potentiels couramment interprétée comme l'effet de la rotation des dipôles constitués par les globes oculaires dont la rétine est polarisée négativement et le globe positivement. Cette méthode comporte l'avantage d'être commode d'application et permet une bonne mesure des saccades mais reste imprécise et ne permet pas une mesure correcte du lieu de fixation. D'autres techniques se basent sur des caractéristiques naturelles de l'oeil en utilisant des composants visibles de l'oeil tels que la pupille ou l'iris. Elles consistent en un enregistrement vidéo de ces structures. L'enregistrement de la pupille est souvent préféré à celui de l'iris car ce dernier est souvent caché en partie par les paupières et la plage de base de fonctionnement est donc souvent plus réduite. D'autres mesures encore se basent sur la réflexion de la lumière dans l'oeil. Celui-ci comporte 4 surfaces transparentes permettant la réflexion de la lumière : l'intérieur et l'extérieur de la cornée ainsi que l'intérieur et l'extérieur du cristallin. Les 4 reflets renvoyés par ces structures sont connus sous le nom d'images de Purkinje. Grâce à ce système de Purkinje, la

réflexion d'un rayon infrarouge permet de mesurer les mouvements oculaires.

Indépendamment des méthodes de mesures des mouvements oculaires, une autre question fait débat dans la littérature : quelles sont les mesures les plus appropriées à l'étude de ces mouvements en lecture ? Faut-il observer plutôt le lieu de la fixation ? Le nombre de fixations ? La durée de la première fixation dans un mot ? La durée totale de toutes les fixations au sein du mot ? La longueur des saccades ? La latence des saccades ? Le nombre de régressions ? Bien que les principales variables utilisées sont la taille et la latence des saccades, le nombre et la durée des fixations, la durée totale des fixations et le nombre de régressions, Rayner (1998), dans sa revue de littérature sur le sujet, précise que les mesures les plus « pures » sont la fixation initiale d'un mot et la durée totale des fixations.

#### **2.3.4.1 Caractéristiques générales des mouvements oculaires en lecture**

Les différentes méthodes de mesure que nous venons d'évoquer ont permis de mieux comprendre les caractéristiques des mouvements oculaires durant la lecture. Ces mouvements diffèrent entre lecture silencieuse et lecture à voix haute. Dans ce dernier cas, les durées de fixation moyennes sont plus longues et les yeux tendent à être en avance sur la voix (ils doivent donc rester en place plus longtemps pour ne pas prendre trop d'avance par rapport à la voix). La grande majorité des données présentées ici concernent la lecture silencieuse. Contrairement à l'intuition que nous avons que le lecteur bouge les yeux de façon continue, il a été mis en évidence que les mouvements oculaires se font par petits sauts entre 2 endroits où les yeux restent immobiles. Les mouvements entre 2 points sont appelés saccades oculaires et le lieu où les yeux restent fixes sont les points de fixation. Les saccades sont des mouvements balistiques très courts (de 6 à 9 caractères) de l'oeil dont la vitesse est extrêmement rapide (25 à 50 millisecondes dépendant de sa longueur). Durant celles-ci, l'oeil ne recueille pas d'information nouvelle concernant la phrase lue (Matin 1974). Durant de nombreuses années, les auteurs (Sanders et Houtmans 1985, Matin et coll. 1993) pensaient que les traitements cognitifs étaient également interrompus pendant les saccades mais Irwin (1998) a mis en évidence que ce n'était pas le cas et que le traitement lexical persistait. L'information visuelle nécessaire à la lecture n'est donc recueillie que lors des fixations. Ces dernières durent entre 200 et 300 millisecondes et constituent 90% de notre temps de lecture. Par ailleurs, une certaine préparation est nécessaire pour pouvoir effectuer la

saccade. Ce temps de latence saccadique dure au minimum entre 150 et 175 ms et est réalisé en parallèle des processus de compréhension. Plusieurs processus sont impliqués dans le « calcul » du lieu vers où exécuter la saccade et le moment adéquat pour le faire. En effet, ce mouvement n'est pas un simple mouvement réflexe et des traitements cognitifs interviennent sur sa programmation (Deubel 1995). Généralement, plus le temps de latence saccadique est long et plus le lieu de la fixation suivante sera précis.

L'une des questions que nous sommes en droit de nous poser est l'utilité de ces saccades. Pourquoi sommes-nous obligés de faire ces mouvements saccadiques pour pouvoir lire ? La réponse est relativement simple : les saccades en lecture sont indispensables au vu des limitations de notre acuité visuelle. Notre champ visuel peut être divisé en 3 régions : fovéale, parafovéale et périphérique. L'acuité visuelle est la meilleure au centre de la fovéa (environ 2°) et décroît très rapidement même à l'intérieur de la fovéa. Elle est encore moins bonne au niveau parafovéal (de l'ordre de 5° de chaque côté de la fixation) et est moindre en vision périphérique. Il est donc indispensable de déplacer notre fovéa pour pouvoir voir clairement les mots écrits. Cependant, nous percevons certaines caractéristiques des stimuli en parafovéal ou en vision périphérique et elles influencent les saccades en déterminant par exemple la nécessité d'effectuer une saccade pour pouvoir identifier le stimulus (ex : un mot de taille normal en parafovéal est mieux et plus vite reconnu s'il y a saccade tandis qu'un mot écrit en plus grand ne nécessite pas de saccade pour être identifié). Bien que le rôle premier de la saccade soit d'amener les mots en vision fovéale pour permettre une analyse détaillée, tous les mots ne sont pas fixés. Le fait qu'un mot soit fixé ou non, dépend à la fois de sa catégorie et de sa longueur. Ainsi, les mots de contenu (noms, verbes, adjectifs) sont fixés dans 85% des cas tandis que les mots de fonction (prépositions, conjonctions, pronoms, articles, etc.) ne le sont que 35% du temps. Les mots courts comme les articles sont fréquemment sautés et la probabilité de fixer un mot augmente à mesure que leur longueur augmente : un mot de 2-3 lettres ne sera fixé que dans 25% des cas tandis que les mots de 8 lettres et plus sont toujours fixés. Les espaces inter-mots ne sont que rarement fixés mais sont d'une grande utilité pour la programmation saccadique car cette information sur le découpage des mots est perçue en vision périphérique et participe à la décision quant au lieu de la fixation suivante.

Les saccades s'effectuent généralement de gauche à droite sauf lors des passages à la ligne où le lecteur doit réaliser une longue saccade vers la gauche et légèrement vers le bas (voir figure 2.4. Certaines autres situations exigent des saccades de droite à gauche, ce sont les retours en arrière que l'on appelle régressions. Elles constituent 10 à 15% des saccades et sont souvent limitées à quelques caractères pour corriger une saccade trop longue. De courtes régressions au sein d'un même mot peuvent aussi refléter une difficulté à le traiter. Des régressions plus longues surviennent suite à un problème de compréhension du texte. Lors du passage à la ligne, la saccade étant très longue, elle est souvent moins précise et nécessite donc des mouvements correctifs vers la gauche. Sur une ligne, les premières et dernières fixations se situent généralement entre 5 et 7 caractères de l'extrémité. La première est généralement plus longue tandis que la dernière est souvent plus courte.

Nous avons présenté la durée de fixation et la longueur de saccades moyennes mais il est à noter qu'il existe pour celles-ci, de même que pour la fréquence de régression, une grande variabilité interindividuelle. Une variété intra-individuelle au sein d'une même portion de texte est également observée, pouvant aller de 100 à 500 ms pour les temps de fixation et de 1 à 15 caractères pour la taille des saccades.

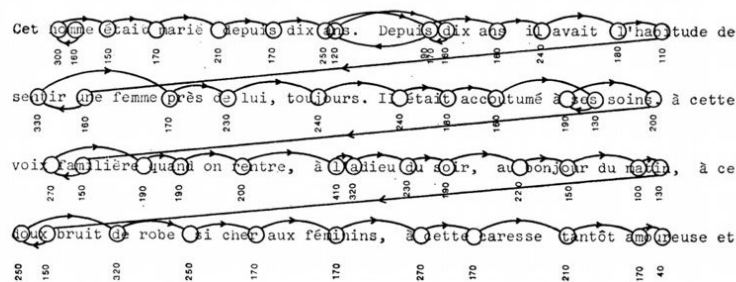


FIGURE 2.4 – Exemples de fixations (○), de saccades (→) et de régressions (←) au cours de la lecture d'un texte (d'après O'Regan et Lévy-Schoen (1978))

#### 2.3.4.2 Taille de l'empan perceptif

Pour évaluer la taille du champ visuel, ou « empan perceptif », dans la lecture, la technique de la « fenêtre mobile » a été mise au point par McConkie et Rayner (1975). Ce système permet de modifier le texte en fonction des mouvements oculaires du lecteur. La ligne de texte n'est intacte qu'à l'intérieur d'une fenêtre dont la largeur est fixée par l'expérimentateur et le reste de la ligne, à l'extérieur de cette fenêtre, est remplacé par une séquence de « X » non informatifs. La fenêtre est centrée au point de fixation du lecteur et se déplace avec la progression des fixations. Lorsque, ayant effectué une saccade, le lecteur fixe un point correspondant à  $n$  caractères vers la droite du point de fixation précédent, la fenêtre a été déplacée simultanément d'autant de caractère de telle sorte qu'elle accompagne sans faille les mouvements oculaires du lecteur. Cette technique permet de manipuler la quantité d'information que le lecteur peut analyser en une seule fixation.

Dans les écritures alphabétiques telles que l'anglais ou le français, la taille de l'empan perceptif est relativement petite et il existe une certaine asymétrie vers la droite de ce champ visuel. En effet, en partant du point de fixation, l'empan comprend 3 à 4 lettres à gauche de ce point et de l'ordre de 14 à 15 caractères à sa droite. Dans les lectures de droite à gauche, cette asymétrie est inversée avec un plus grand nombre de lettres perçues à gauche de la fixation. Bien que l'empan perceptuel soit de 14-15 caractères à droite du point (en français), cela ne signifie pas que les mots peuvent être identifiés aussi loin (seules quelques informations telle que la longueur du mot par exemple peuvent être extraites). L'empan d'identification de mots est plus court et limité à 7 ou 8 lettres à droite du point de fixation. Mais la taille de l'empan doit-elle être définie en terme de lettres ou de mots ? La réponse diffère à droite ou à gauche de la fixation. La frontière de l'empan à gauche est d'abord définie par le début du mot fixé tandis qu'à droite, la frontière est définie en nombre de lettres. Ici encore, il faut noter une certaine variation intra-individuelle avec un empan qui peut différer en fonction, par exemple de la difficulté du texte : plus le texte est difficile et plus l'empan est réduit. Notons encore que la taille de ce champ visuel en lecture varie également en fonction du système d'écriture. Ainsi, pour les lecteurs japonais, l'empan n'est que de 13 caractères (dont 6 à gauche) (Ikeda et Saida 1978). De plus, Osaka (1987) a observé que cet empan était plus grand pour des textes combinant les écritures kanji (système idéographique) et kana (système phonétique) que lorsque le texte était écrit

exclusivement en caractères kana. Nous verrons dans ce travail que les capacités de lecture interviennent également sur l’empan perceptif avec un empan plus faible pour les lecteurs débutants. L’asymétrie est toutefois mise en évidence aussi chez ces sujets (Rayner 1998).

### **2.3.5 La position optimale du regard (the Optimal Viewing Position)**

Dans la section précédente, nous avons mis en évidence que, lors de la lecture, les yeux effectuaient des saccades pour aller d’un point de fixation à un autre et que le lieu de la fixation était important sachant que l’empan perceptif est réduit et asymétrique autour de ce point. Nous allons voir maintenant que plusieurs auteurs ont étudié la position du regard au sein des mots.

L’acuité visuelle diminue au sein même de la fovéa et la dégradation se poursuit de façon continue au fur et à mesure que l’on s’en éloigne (Anstis 1974, Levi et coll. 1985, Nazir et coll. 1992). Lorsque nous fixons une lettre dans un mot, celle-ci est parfaitement perçue tandis que celles qui l’entourent sont moins visibles. La diminution de l’acuité visuelle n’est pas la seule à intervenir sur la perception des lettres. Un autre phénomène bien connu réduit davantage la qualité de l’information recueillie par l’oeil : le masquage latéral (Bouma 1970).

La visibilité d’une lettre isolée, c’est-à-dire entourée de 2 espaces blancs (ex : « a »), est meilleure que lorsque cette même lettre est entourée de deux autres lettres. C’est vrai pour des lettres visuellement très différentes (ex : « tad ») mais ça l’est d’autant plus lorsqu’elles sont visuellement similaires (ex : « eae »). Ce masquage provient non seulement pour les lettres adjacentes mais également pour les lettres voisines plus éloignées comme dans les pseudomots (ex : « setniartnoc »). Dans ce cas, le « a » central est très difficile à identifier tandis que les lettres extrêmes (« s » et « c ») le sont moins car elles ne sont masquées que d’un côté. Dans le mot « contraintes », malgré un masquage latéral identique, il s’avère beaucoup plus facile d’identifier le « a ». Nous discuterons ce fait dans la suite de notre travail.

La probabilité de reconnaître un mot est fonction de la probabilité de reconnaître les lettres qui le composent (O’Regan 1990). L’efficacité d’identification d’un mot est donc directement en lien avec la lettre fixée dans le mot (O’Regan et coll. 1984). De nombreux auteurs se sont attachés à mettre en évidence le lieu de fixation dans un mot où sa reconnaissance est la meilleure. Ils ont constaté que la reconnaissance



d'un mot était optimale lorsqu'il était fixé à mi-chemin entre son début et son milieu, soit légèrement à gauche du centre du mot pour les langues lues de gauche à droite (Vitu et coll. 1990, Vitu 1991a;b;c, O'Regan et coll. 1984, Farid et Grainger 1996, Nazir et coll. 1998). Cet endroit de fixation où la reconnaissance est maximale a été appelé « Optimal Viewing Position » (OVP ci-après) ou position optimale du regard. Cette hypothèse a été testée avec plusieurs expériences par O'Regan et son équipe (voir Nazir et coll. (1998) pour une synthèse de leurs travaux). Ils ont montré que les refixations étaient moindres et que la durée totale de fixations sur le mot diminuait si la première fixation se situait légèrement à gauche du centre du mot. De même, un mot présenté brièvement sera plus facilement reconnu lorsque la fixation oculaire se fait à cet endroit.

Une explication évidente de l'Optimal Viewing Position serait la dégradation continue de l'acuité visuelle à mesure que l'on s'éloigne du centre de la fovéa mais selon cette hypothèse, l'OVP devrait se situer au centre du mot or nous venons de voir que cette position optimale est asymétrique et localisée légèrement à gauche du centre. Plusieurs facteurs ont été proposés afin de rendre compte de cette asymétrie :

- La direction de lecture. Comme nous l'avons souligné précédemment, l'empan perceptif est plus étendu à droite qu'à gauche pour les langues lues de gauche à droite et l'inverse est observé pour les langues lues de droite à gauche. Les courbes typiques de l'OVP, décalées vers la gauche, ont été mises en évidence pour des langues lues de gauche à droite tandis qu'en arabe par exemple, où la lecture se fait de droite à gauche, la courbe est plutôt symétrique (Farid et Grainger 1996).
- Des contraintes lexicales telle que la structure morphologique du mot. Holmes et O'Regan (1992) ont montré que la position optimale du regard est plutôt décalée à gauche du centre pour les mots dont la racine se trouve au début (comme dans le mot « danseur » par exemple) et plutôt vers la droite quand la racine est à la fin (comme dans « repeindre ») en comparaison avec des mots monomorphémiques. De même, le lieu où se situe l'information pertinente dans le mot entre en jeu avec un OVP à gauche du centre quand le mot est informatif par son début et plus à droite quand l'information est à la fin. La fréquence d'occurrence et la longueur des mots interviennent également sur la position optimale du regard avec une localisation légèrement à gauche du centre du mot pour les mots longs et rares et exactement au centre pour des mots courts et fréquents.

- La spécialisation hémisphérique. Dans une étude comparant des sujets dont l'hémisphère gauche ou droit était dominant pour le langage, Brysbaert (1994) a constaté que l'effet de facilitation de lecture lorsque le mot est fixé au début est plus important pour les personnes à dominance hémisphérique gauche. Bien que cet effet ne soit pas assez conséquent pour entraîner une facilitation de lecture pour les mots fixés à la fin chez les sujets à dominance hémisphérique droite (ce qui appuie l'hypothèse d'une combinaison de plusieurs facteurs), il était néanmoins assez fiable et consistant car observé chez tous les participants. Cet effet pourrait s'expliquer par le fait que les informations (dans ce cas, les lettres) présentées dans le champ visuel droit sont directement projetées dans l'hémisphère gauche, prédominant pour le traitement du langage chez 95% des droitiers et 50% des gauchers (voir Brysbaert (2004)).
- L'asymétrie de visibilité des lettres. Plusieurs auteurs (Bouma 1973, Nazir 1991, Nazir et coll. 1992; 1998) ont mis en évidence que les lettres n'avaient pas la même visibilité selon leur position. En effet, la visibilité serait meilleure pour les lettres situées à droite du point de fixation que celles à gauche de celui-ci. L'asymétrie de la position optimale du regard dans le mot serait donc due, au moins en partie, à l'asymétrie de la visibilité des lettres composant le mot (Nazir et coll. 1992; 1998).
- La fréquence positionnelle des lettres. D'autres chercheurs (Peressotti et Grainger 1999, Stevens et Grainger 2003) se sont intéressés à un codage positionnel des lettres avec un codage précis pour les lettres situées aux extrémités (première et dernière) d'une séquence, quelque soit la longueur de celle-ci, et un codage relatif des lettres « internes ». Dans leur étude, Stevens et Grainger (2003) montrent qu'une combinaison entre la visibilité des lettres et une mesure de la fréquence positionnelle des lettres rend compte très précisément de la courbe asymétrique de la position du regard obtenue avec des mots.
- L'apprentissage perceptif. Dans cette hypothèse, le propos n'est plus que les mots sont plus souvent fixés entre le début et le centre du mot parce que c'est à cet endroit qu'ils sont les mieux reconnus mais plutôt de dire que c'est parce que les fixations se font le plus souvent à cet endroit que les mots sont mieux reconnus quand ils sont fixés là. L'asymétrie de la fonction de la position du regard résulterait de la fréquence à laquelle les mots ont été vus aux différentes positions de fixation (Nazir 2000).

### 2.3.6 L'effet de supériorité du mot (Word Superiority Effect : WSE)

Dès 1886, Cattell (1886) a constaté que des mots présentés brièvement étaient plus facilement identifiés que des séquences aléatoires de lettres. Près d'un siècle plus tard, Reicher (1969) et Wheeler (1970) ont mis au point une procédure ingénieuse d'identification de lettres par choix forcé qui neutralise la perte de mémoire et les stratégies de devinement (voir figure 2.5). Celle-ci consiste à présenter un mot brièvement et le faire suivre d'un masque et de deux lettres alternatives, l'une contenue dans le mot et l'autre non. Le sujet doit choisir parmi ces deux lettres, celle qui se retrouve dans le mot. La lettre intruse permet bien entendu également de former un mot pour éviter les stratégies de devinement. Ainsi, pour une identification de la troisième lettre du mot « SALON » par exemple, les deux lettres pourraient être le « L » et le « V ». Reicher a testé 3 types de stimuli : des mots (SALON), des lettres isolées (L) et des non-mots non prononçables (OALSN).

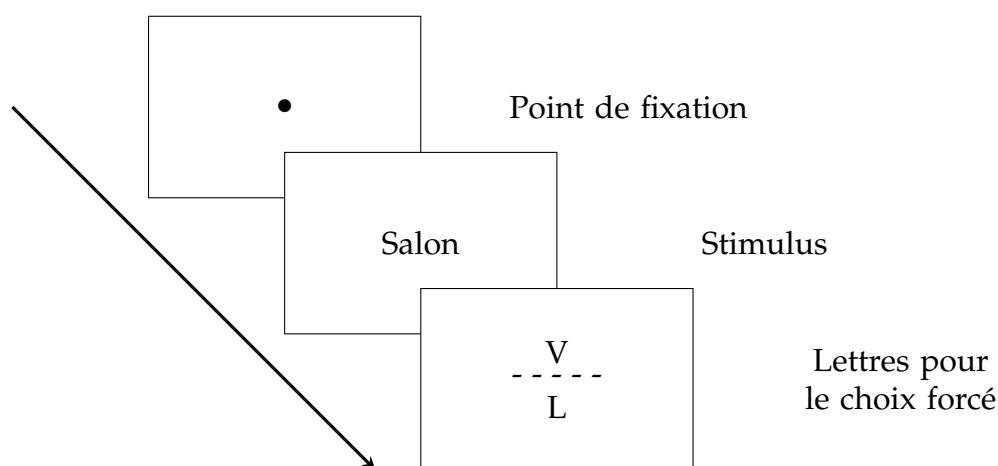


FIGURE 2.5 – Paradigme de choix forcé mis au point par Reicher (1969) et Wheeler (1970)

Deux effets de supériorité du mot ont ainsi été mis en évidence :

- L'effet « mot-nonmot » avec une meilleure identification quand la lettre se situe dans un mot que dans un non-mot
- L'effet « mot-lettre » où une lettre est identifiée plus facilement lorsqu'elle est présentée dans un mot qu'isolément

De ses résultats, Reicher (1969) conclut que notre connaissance (lexicale) des mots influence le processus de perception des lettres.

Ces effets ont été répliqués à de nombreuses reprises (Wheeler 1970, Johnston et McClelland 1973; 1974; 1980, Grainger et Ferrand 1994, Jordan et Bevan 1994, Martin et coll. 2006) et sont donc très robustes. Toutefois, ils peuvent être supprimés dans de rares circonstances. Ainsi, l'effet « mot-lettre » n'est plus observé lorsque le masque apparaissant après le stimulus (post-masque) est supprimé (Johnston et McClelland 1973, Marchetti et Mewhort 1986).

Les effets que nous venons de présenter concernaient les mots mais d'autres recherches se sont intéressées à un effet similaire avec des pseudomots (non-mots prononçables). Les performances d'identification de lettres sont effectivement meilleures quand les lettres sont présentées dans des pseudomots que lorsqu'elles sont présentées isolément (McClelland et Johnston 1977, Carr et coll. 1978) ou dans des non-mots imprononçables (Baron et Thurston 1973, McClelland 1976, Grainger et Jacobs 1994). Suite à ces résultats, l'hypothèse de la prononçabilité a été avancée comme explication de l'effet de supériorité du mot. Rumelhart et McClelland (1982) ont toutefois présenté des données à l'encontre de cette hypothèse. De même, leur expérience montre que le WSE n'est pas dû à la régularité orthographique (Ferrand 2007).

### **2.3.6.1 L'effet de supériorité du mot et les modèles actuels**

En s'appuyant sur leur modèle à Activation Interactive présenté dans la partie 2.3.3.1, McClelland et Rumelhart (1981) ont interprété le WSE comme étant la preuve d'un « feedback » descendant sur la perception, allant d'un haut niveau de traitement, le traitement des mots, vers un bas niveau de traitement, celui des lettres. Ils expliquent cet effet de supériorité du mot par une rétroaction d'information du niveau des représentations orthographiques lexicales (des unités mots) vers le niveau des lettres. Cette rétroaction engendre une augmentation de l'activation des lettres composant le mot et donc une augmentation de la probabilité que ces lettres soient choisies dans la tâche de Reicher. De plus, cette rétroaction du niveau des mots vers le niveau des lettres est plus importante pour les mots et les pseudomots que pour les non-mots ce qui explique à la fois l'effet de supériorité du mot et du pseudomot. Cet effet serait obtenu en présence d'un post-masque parce que l'analyse perceptive des lettres individuelles résiste plus au post-masque lorsque les lettres sont dans des mots que lorsqu'elles sont isolées. En condition d'absence de masque, l'inhibition de l'activation au niveau des traits et des lettres

est supprimée et le WSE n'est donc plus observé. Ce modèle a permis de simuler avec succès les divers effets de supériorité du mot.

Une autre interprétation du WSE est proposée par Paap et coll. (1982) sur la base de leur modèle à activation-vérification (voir section 2.3.2.1 pour une description du modèle). Tout comme dans le modèle à Activation Interactive, ce modèle comprend un niveau des lettres (appelé « alphabetum ») et un niveau des mots (appelé « lexique »). En revanche, il n'y a pas ici de rétroaction mais une activation unidirectionnelle du bas vers le haut, c'est-à-dire des lettres vers les mots. Il n'existe pas non plus dans ce modèle de système d'inhibition entre les mots. Tous les mots qui atteignent un certain seuil d'activation sont candidats et vont subir une procédure de vérification un par un par ordre de fréquence d'occurrence. La vérification porte sur la comparaison des caractéristiques visuelles du candidat avec celles du stimulus. L'identification est finie lorsque l'un des candidats est apparié au stimulus présenté. L'hypothèse de Paap et coll. (1982) pour expliquer le WSE est la suivante : le post-masque obscurcit l'entrée visuelle et empêche dès lors la procédure de comparaison. Le sujet est alors obligé d'utiliser l'information du niveau des lettres en plus de celle du niveau des mots. Les réponses au Reicher résulteraient donc de l'activité de ces deux niveaux. Or, dans ce modèle, les performances sont meilleures quand les décisions reposent sur l'information lexicale car l'activité du lexique contraint plus l'identité des lettres que ne le fait l'activité de l'alphabetum. L'avantage pour l'identification de lettres dans un mot par rapport au non-mot est lié au fait que dans la première situation, l'information lexicale est utilisée deux fois sur trois. Ce modèle prédit par ailleurs un petit effet de mots comparés aux pseudomots car ce serait la quantité de l'information lexicale qui serait responsable du WSE. En effet, les pseudomots activent presque autant le lexique mental que les mots tandis que les non-mots l'activent beaucoup moins. Ces différences d'activation expliqueraient l'effet de mots et de pseudomots par rapport aux non-mots et la légère différence entre mots et pseudomots. Cette hypothèse a été reprise par Grainger et Jacobs (1994) dans leur « Dual-read-out model of word context effects on letter perception » où une lettre peut être identifiée soit par une activation directe des représentations des lettres (letter read-out) soit par une identification par déduction après identification du mot (word read-out). Cette dernière voie serait plus avantageuse lorsque l'identification des lettres est rendue difficile par une présentation brève ou un masquage, mais est inexploitable dans

le contexte non-mot.

Le point commun entre ces modèles est qu'ils expliquent tous le WSE par une activation plus importante au niveau lexical pour les mots que pour les pseudo-mots et les non-mots.

## 2.4 L'IDENTIFICATION DES MOTS ÉCRITS

Dans la partie précédente, nous avons présenté les différents modèles de la prise d'information visuelle en lecture et des premiers traitements de celle-ci. Nous pressentons néanmoins que la lecture ne se limite pas à effectuer les mouvements oculaires adéquats et à bien identifier les lettres mais qu'il faut, à un niveau de traitement supérieur, parvenir à l'identification du mot lui-même. Nous allons donc maintenant voir quels sont les modèles de lecture et les différentes étapes permettant de déchiffrer et comprendre les mots.

### 2.4.1 Les modèles de lecture experte

Dans la littérature, deux types de modèles de lecture de mots isolés sont traditionnellement mis en opposition. Les premiers, les modèles à double voie, sont issus d'une théorie dualiste et supposent que la lecture de mots familiers se fait par un mécanisme différent et fonctionnellement indépendant de la lecture de mots nouveaux ou de pseudomots. Le second type de modèles, les modèles connexionnistes, sont en revanche plus unitaires et postulent que l'ensemble des items est lu par un système unique d'activation/inhibition d'unités de différents axes (orthographique, phonologique, sémantique, mnésique).

#### 2.4.1.1 Les modèles à double voie

Dans les années 1970, l'avènement de la neuropsychologie cognitive et l'utilisation de méthodes de la psychologie expérimentale ont conduit à une meilleure compréhension de certaines pathologies telle que la dyslexie et, en retour, à un affinement des modèles théoriques de la lecture. Marshall et Newcombe (1973) ont mis en évidence une dissociation chez des patients souffrant de dyslexie acquise et ont

ainsi proposé qu'il existait deux types de dyslexie : *la dyslexie profonde* et *la dyslexie de surface*. La première se caractérise principalement par des erreurs sémantiques (ex : « mardi » pour « dimanche ») et par la lecture très pauvre de pseudomots, tandis que dans la seconde, les erreurs concernent plutôt les mots irréguliers et sont des régularisations (ex : « monsieur » lu « mōsioer »). Quelques années plus tard, des patients présentant un autre type de dyslexie ont été étudiés. Ceux-ci ne commettaient pas d'erreur sémantique mais ne parvenaient pas non plus à lire des pseudomots : c'est ce qui a été appelé la *dyslexie phonologique* (Beauvois et Dérouesné 1979).

Cette double dissociation entre des patients qui présentent un déficit de lecture touchant uniquement les pseudomots ou les nouveaux mots et d'autres ayant un déficit isolé en lecture des mots irréguliers permet d'appuyer l'hypothèse proposée par Forster et Chambers (1973) de l'existence de deux mécanismes alternatifs pour lire. Un premier modèle intégrant cette idée a été proposé par Morton et Patterson (Morton et Patterson 1980) (voir figure 2.6). Ce modèle postule l'existence de deux procédures de lecture indépendantes et parallèles et s'activant selon un mode « tout ou rien ».

L'une des deux voies consiste en une analyse globale du stimulus écrit, à un trai-

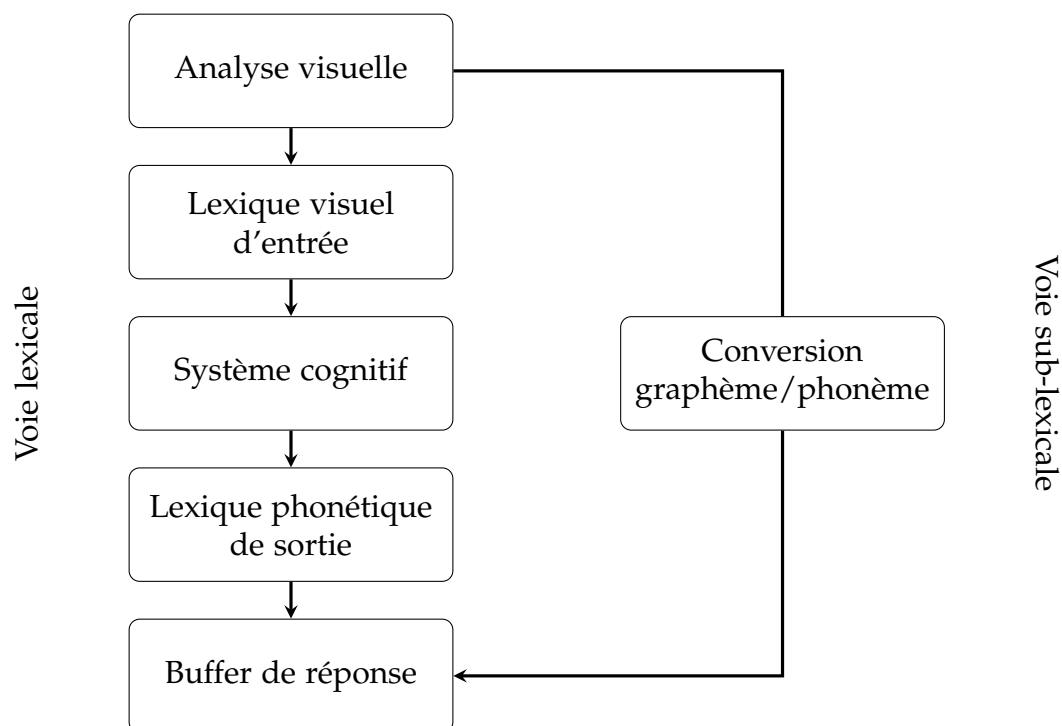


FIGURE 2.6 – Modèle de la lecture selon Morton et Patterson (1980)

tement par le système cognitif et à une association de la forme écrite à la trace phonologique correspondante. L'autre voie convertit les graphèmes en phonèmes. Ces 2 mécanismes aboutissent à un « buffer » de sortie, sorte de mémoire tampon qui permet le maintien de la trace phonologique le temps d'effectuer d'autres traitements telle que la mobilisation du système articulatoire.

Coltheart (Coltheart 1978, Coltheart et coll. 1980) présente un modèle similaire en y introduisant un module supplémentaire permettant l'accès au sens : le système sémantique. Il introduit aussi les termes de voies lexicale et sub-lexicale (voir figure 2.7).

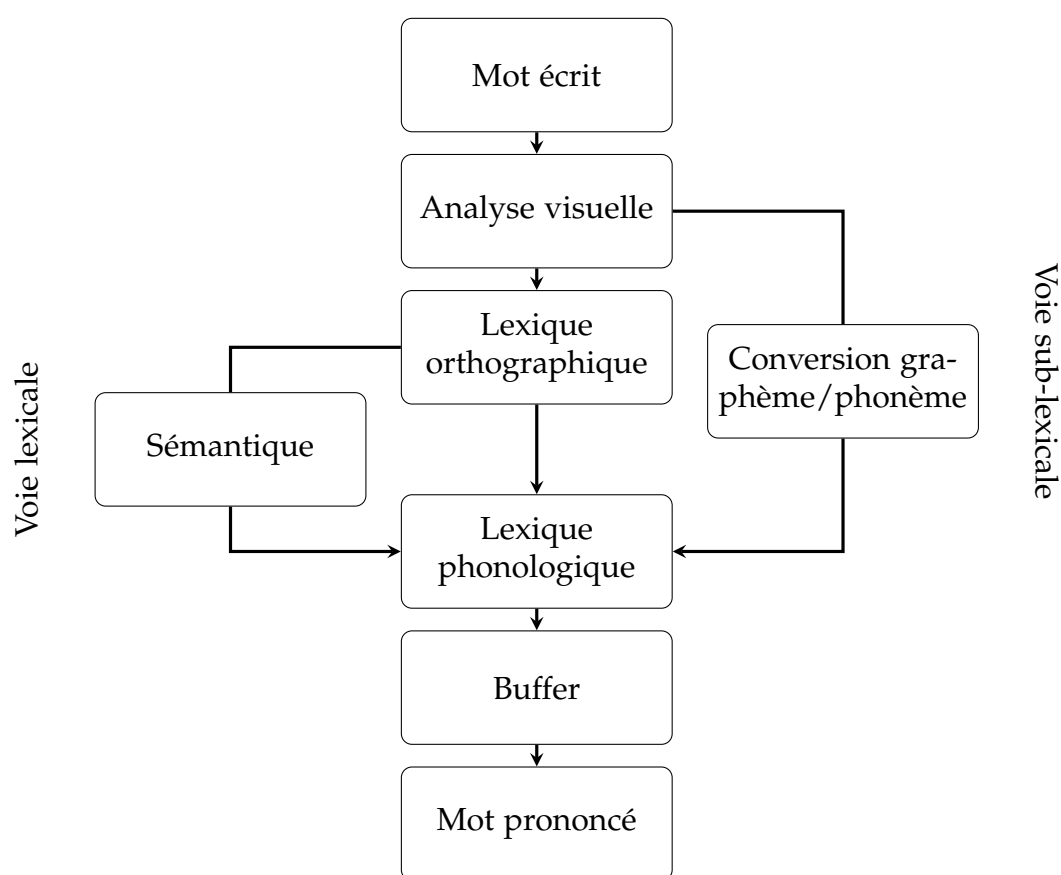


FIGURE 2.7 – Modèle de lecture à double voie selon Coltheart et coll. (1980)

- La voie lexicale : la lecture se fait ici par un accès direct à la forme globale du mot qui a été enregistrée dans le lexique interne lors de présentations antérieures. Cet accès permet ensuite d'atteindre la forme phonologique du mot. Elle est aussi mentionnée sous les termes de voie d'adressage ou voie directe étant donné cet accès direct aux représentations phonologiques par l'activation de la trace mnésique du mot, appelée représentation abstraite du mot ou



« Visual Word Form ». Cette voie nécessite bien entendu que les mots aient déjà été rencontrés et est donc utilisée pour la lecture de mots familiers. Le système sémantique introduit par l'auteur permettrait de retrouver le sens directement à partir de la forme écrite. Certains ont dès lors parlé d'un modèle à trois voies avec une voie lexicale sémantique et une non-sémantique.

- La voie sub-lexicale : le passage de la forme écrite à la forme phonologique se fait par une série de règles de conversion grapho-phonémiques. Le stimulus écrit est décomposé en graphèmes qui sont ensuite associés aux phonèmes correspondants et ceux-ci fusionnent pour parvenir à la forme phonologique du mot. Plusieurs appellations peuvent être retrouvées pour cette même voie : elle est dite phonologique, par assemblage, indirecte ou non lexicale. Elle permet la lecture de pseudomots ou de mots réguliers.

Ce modèle à 2 voies a récemment été implémenté sur ordinateur par Coltheart et coll. (2001) : le modèle à deux routes en cascade (« Dual Route Cascade Model », DRC ci-après) (voir figure 2.8). Comme son nom l'indique, l'information est transmise en cascade d'un niveau à l'autre : dès qu'un niveau est activé, l'activation est transmise aux autres niveaux de ce modèle. Cette transmission en cascade permet la lecture de nouveaux mots et de non-mots qui par définition ne sont pas stockés dans le lexique mental. Ce modèle comporte en fait trois routes mais seules les 2 premières ont été implémentées : la route non lexicale, la route lexicale non sémantique et la route lexicale sémantique. Chacune d'elle se compose de plusieurs niveaux qui interagissent via des connexions excitatrices ou inhibitrices. Ces activations et inhibitions se propagent de façon graduelle (et non plus sous la forme de « tout ou rien ») et interactive, c'est-à-dire que tous les modules contribuent à l'activation ou l'inhibition des modules adjacents et de façon bidirectionnelle. Les différents niveaux contiennent des unités symboliques : des mots, des lettres, des phonèmes et des traits visuels. Voyons à présent le fonctionnement de ces 3 voies.

- La route non lexicale : cette route convertit la suite de lettres en une suite de phonèmes grâce à des règles de conversion grapho-phonémiques. Ces règles sélectionnées selon un critère purement statistique de fréquence, le phonème assigné à un graphème donné étant celui le plus souvent associé, en tenant compte toutefois de la position dans le mot. Cette route opère de façon sérielle, les lettres sont converties l'une après l'autre et de gauche à droite.

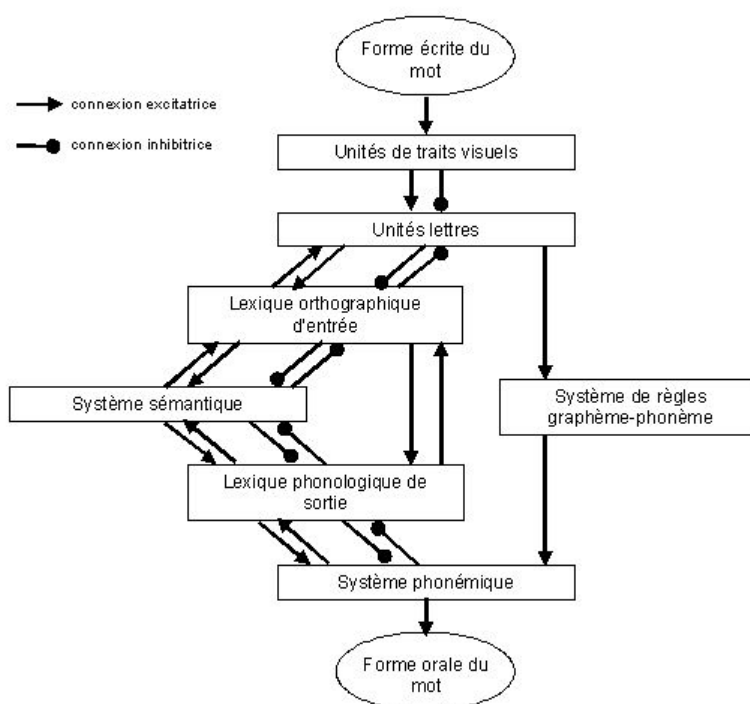


FIGURE 2.8 – *Modèle double-voie à traitement en cascade (Coltheart et coll. 2001)*

- La route lexicale non sémantique : le mot présenté visuellement active les traits visuels correspondants. Ceux-ci vont activer les unités lettres en parallèle à toutes les positions. L'unité orthographique sera ensuite activée dans le lexique orthographique et cette unité va activer directement la forme phonologique du mot dans le lexique phonologique sans passer par le système sémantique. L'activation des phonèmes correspondants se fait en parallèle à toutes les positions. Le lexique orthographique peut traiter des mots monosyllabiques de 1 à 8 lettres. Les unités y sont pondérées par leur fréquence d'occurrence de sorte qu'un mot de haute fréquence sera activé plus rapidement qu'un mot peu fréquent.
- La route lexicale sémantique : Cette route n'a pas été implémentée dans ce modèle mais l'a été par Harm et Seidenberg (Harm et Seidenberg 2004) dans un modèle connexionniste présenté dans la section suivante (Seidenberg et McClelland 1989). Cette voie consiste en des connexions directes entre les lexiques orthographique et phonologique et le système sémantique.

Les routes lexicales et non-lexicales ne sont pas totalement indépendantes étant donné qu'elles partagent plusieurs niveaux : les couches d'unités traits, lettres et phonèmes. Quand un stimulus visuel est présenté, le traitement débute par l'ana-

lyse des traits et l'activation des lettres correspondantes. Il se poursuit simultanément dans les 2 voies. La voie lexicale, directe et plus rapide, intervient de façon prépondérante pour la lecture de mots fréquents, réguliers ou irréguliers. La voie de conversion grapho-phonémique permet quant à elle la lecture de mots moins fréquents ou de pseudomots. Les 2 routes aboutissent à la forme phonémique du mot stockée dans une mémoire tampon commune et permettant ensuite la prononciation du mot. Il est évident que ces 2 voies sont indispensables : la voie non-lexicale permettant de déchiffrer les mots nouveaux qui seront à terme reconnus par la voie lexicale et cette voie lexicale est nécessaire à la prononciation de mots irréguliers.

Ce modèle permet de simuler plusieurs effets classiques de la lecture à voix haute : (1) l'effet de fréquence (Forster et Chambers 1973), (2) l'effet de régularité et l'interaction entre ces deux effets (Seidenberg et coll. 1984), (3) l'effet de pseudohomophonie, (4) l'effet de la taille du voisinage, (5) l'effet de répétitions et bien d'autres effets expérimentaux. Toutefois, le modèle semble rencontrer des difficultés pour simuler les effets de fréquence du voisinage et de supériorité du mot.

Par ailleurs, le DRC s'applique à l'anglais, l'allemand, le français et l'italien mais n'est sûrement pas adapté à des systèmes d'écritures très différents tels que le chinois, le japonais, le coréen ou encore l'hébreu. Il ne partage pas l'hypothèse d'un codage phonologique universel dans la lecture silencieuse et restreint ce codage aux systèmes alphabétiques ayant des voyelles.

Un point fort de ce modèle est qu'il rend compte avec succès de deux types de dyslexies : la dyslexie phonologique et la dyslexie de surface, conséquences d'un trouble des voies non-lexicale et lexicale respectivement.

Bien que les performances de ce modèle sont très bonnes et que sa simplicité et sa clarté le rendent particulièrement attrayant, il a récemment été critiqué par Perry, Ziegler et Zorzi (Perry et coll. 2007) qui ont proposé un modèle connexionniste incorporant une partie du DRC et capable de simuler encore plus de performances. Il sera présenté dans la partie suivante consacrée à ces modèles connexionnistes.

#### **2.4.1.2 Les modèles connexionnistes**

Les approches connexionnistes postulent que les mécanismes sous-jacents aux activités cérébrales peuvent être décrits à l'aide de réseaux d'unités simples interconnectées. Ces unités de traitement sont constituées en couches organisées hiérarchiquement. Chaque unité est connectée à d'autres unités de différentes couches et

le poids de ces connexions varie avec l'expérience du système et est cruciale pour déterminer le traitement effectué. Une unité de traitement s'active lorsque le niveau de stimulation reçu de la part des autres unités dépasse un certain seuil. Ce dernier est déterminé à la fois par le degré d'activation de l'unité de traitement qui envoie l'activation et par le poids de la connexion entre les unités. L'activation des différentes unités de traitement est simultanée. Dans ce type de modèle, la connaissance est représentée par le poids des connexions au sein de toutes les unités du système. Une partie, ou un élément du système, ne correspond pas à une connaissance particulière : la connaissance est distribuée sur toutes les unités et leurs interconnexions. C'est pour cette raison, et parce que le traitement se produit sur de nombreuses unités en parallèle, que ces systèmes sont souvent désignés comme des systèmes de traitement distribué en parallèle ou, en anglais, Parallel Distributed Processing (PDP). L'apprentissage se fait à partir d'un ajustement du poids des connexions entre les unités de traitement pour chaque réponse fournie par le modèle. Celle-ci est comparée à la réponse correcte et les connexions peuvent être renforcées ou affaiblies en fonction de la similarité entre les deux réponses. L'apprentissage des règles sous-jacentes est donc implicite et celles-ci ne sont pas explicitement représentées. Les systèmes connexionnistes sont très efficaces pour généraliser les expériences antérieures en appliquant des règles implicites à de nouvelles situations en fonction de leurs similitudes avec des problèmes rencontrés précédemment.

Selon ces modèles, un mot n'est donc pas représenté par l'activité d'unités individuelles mais bien par un pattern d'activation qui met en jeu un ensemble d'unités. Chacune d'elle intervenant dans la représentation de nombreux autres mots, les mots similaires engendrent ainsi des patterns d'activation semblables. Les relations entre orthographe, phonologie et sémantique sont encodées au travers des poids de connexion, qui sont modifiés au fil de l'expérience individuelle.

### **Le modèle de lecture à traitement parallèle (PDP) de Seidenberg et McClelland**

(Seidenberg et McClelland 1989). Ce modèle postule que l'identification d'un mot nécessite la computation de 3 types de code : les codes orthographique, phonologique et sémantique. Il comprend dès lors trois composantes interconnectées encodant les représentations de ces 3 codes. Chaque code correspond à une représentation distribuée, c'est-à-dire à un pattern d'activations distribuées sur un nombre d'unités de représentations primitives. Dans ce modèle, seule la connexion orthographe → phonologie a été implémentée. Il comprend donc des unités codant les informations orthographiques et phonologiques ainsi que des unités cachées permettant de faire le lien entre

celles-ci. Les unités sont massivement interconnectées et opèrent en parallèle. Chaque suite de lettres est caractérisée par un patron d'activation à travers les unités orthographiques et phonologiques qui correspondent aux représentations des codes orthographiques et phonologiques du modèle. Un aspect fondamental de ce modèle est son utilisation de représentations distribuées. C'est par ce type de représentations que ce modèle diffère des autres modèles de lecture qui font l'hypothèse de l'existence d'un ou plusieurs lexiques dans lesquels sont stockées différentes informations. Dans le modèle PDP, les représentations orthographiques, phonologiques et sémantiques ne sont pas stockées dans des lexiques séparés et la lecture n'implique pas la récupération dans ces lexiques des différentes représentations. Au contraire, la lecture entraîne le calcul d'un patron d'activations orthographique, phonologique et sémantique, représentées de façon distribuée dans le cerveau du lecteur. Ce modèle permet de simuler de nombreux résultats dans les tâches de décision lexicale et en prononciation de mots mais obtient de moins bonnes performances en prononciation de pseudomots. De plus, il est limité par le fait que les connexions unités orthographiques  $\rightarrow$  sémantiques et phonologiques  $\rightarrow$  sémantiques ne sont pas implémentées. Plusieurs extensions ont été proposées afin de pallier ces lacunes.

**L'extension du modèle par Plaut et coll. (1996)** . Ces auteurs se sont attachés à transformer le modèle pour améliorer les résultats en prononciation de pseudomots. Ils ont abandonné le système de représentations distribuées au profit d'unités discrètes et locales. La procédure d'apprentissage et l'architecture sont identiques au modèle précédent avec des unités orthographiques et phonologiques ainsi que des unités cachées. Toutefois, le codage orthographique n'est pas le même. En effet, dans le modèle de base, les mots sont encodés comme un patron d'activation en trigrammes tandis que dans cette extension, ces unités orthographiques correspondent à des graphèmes et les unités phonologiques correspondent à des phonèmes. L'utilisation de représentations symboliques locales discrètes améliore les performances en prononciation mais est en désaccord avec la philosophie même des modèles de traitement parallèle distribué qui utilisent par essence des représentations distribuées et non pas locales.

**L'extension du modèle par Harm et Seidenberg (2004)** . Cette extension du modèle PDP développe l'aspect sémantique en modélisant les deux connexions menant au codage sémantique : l'une, dite « directe », passe des unités ortho-

graphiques aux unités sémantique tandis que l'autre, appelée connexion phonologique, transite par les unités phonologiques. Ce modèle ne postule pas l'existence de deux routes indépendantes qui opèreraient en parallèle avec l'une ou l'autre permettant l'accès à la sémantique mais adopte plutôt l'idée d'une dépendance entre les deux voies (orthographique et phonologique). Ces deux voies agiraient conjointement pour parvenir à une récupération sémantique plus efficace. Les deux sources d'activation opèrent simultanément et contribuent à accéder à la signification. L'activation simultanée de ces deux voies est l'originalité de ce modèle et le rend plus efficace pour simuler les effets classiques de la lecture.

**Le modèle connexionniste à deux processus(CDP+) de Perry et coll. (2007) .**

Comme son nom l'indique, le CDP+ appartient à la famille des modèles à deux routes de type DRC mais contrairement à ce dernier, il utilise une architecture entièrement connexionniste. Ce modèle à 2 processus a pour point de départ l'architecture d'un modèle antérieur (CDP) développé par Zorzi et collaborateurs (Zorzi et coll. 1998) où la composante sous-lexicale est particulièrement importante. CDP+ combine donc le réseau sous-lexical de CDP (auquel sont ajoutées des représentations graphémiques dans un buffer graphémique) et la route lexicale localiste de DRC (avec une sortie phonologique modifiée). Ces deux routes aboutissent à un même buffer phonologique de sortie correspondant à un réseau compétitif dans lequel les codes phonologiques lexicaux et sous-lexicaux sont intégrés en temps réel pour produire une prononciation finale (voir figure 2.9).

Ce modèle permet de simuler l'ensemble des effets expérimentaux qu'un modèle de lecture doit pouvoir reproduire (Coltheart et coll. 2001), à savoir :

L'effet de fréquence : les mots fréquents sont prononcés plus rapidement et correctement que les mots de basse fréquence.

L'effet de lexicalité : les résultats de lecture sont meilleurs en vitesse et en précision pour les mots que pour les pseudomots.

L'effet de régularité : la prononciation de mots irréguliers est plus lente et moins bien réussie que celle de mots réguliers et ce, même lorsque la fréquence est contrôlée.

L'effet de consistance des mots : les mots consistants (mots dont la correspondance graphèmes-phonèmes est stable) sont lus plus rapidement et

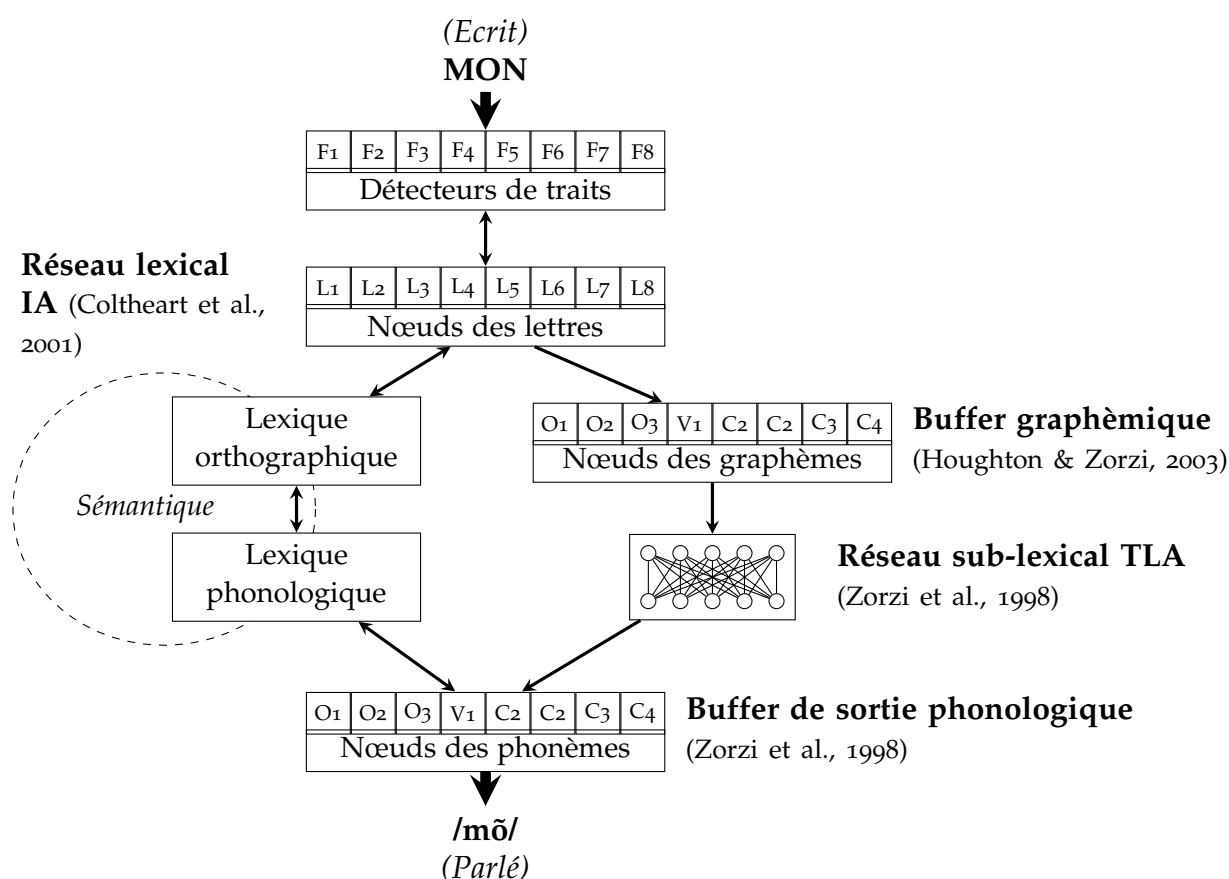


FIGURE 2.9 – *Modèle connexionniste à deux processus (CDP+) de Perry et coll. (2007)*

plus correctement que les mots inconsistants. La taille de cet effet dépend du taux amis/ennemis du mot.

L'effet de consistance des pseudomots : la prononciation des pseudomots présente des effets graduels de la consistance, les correspondances graphèmes-phonèmes les plus communes ne sont pas toujours celles utilisées.

L'effet de longueur : les latences de prononciation augmentent linéairement pour chaque lettre supplémentaire.

L'effet de position de l'irrégularité : l'effet de régularité est plus important quand l'irrégularité se situe en début de mot (ex : chœur) que lorsqu'elle se situe en seconde ou troisième position (ex : orchidée).

L'effet de voisinage : la prononciation d'un mot avec beaucoup de voisins phonologiques est plus rapide et meilleure que pour les mots ayant peu de voisins.

L'effet d'amorçage : les mots précédés d'une amorce avec la même attaque

sont prononcés plus aisément (en précision et en vitesse) que ceux précédés d'une amorce non reliée.

L'effet de pseudohomophonie : la lecture de pseudomots est facilitée s'ils se prononcent comme des mots (ex : aricaeu).

La double dissociation entre dyslexie phonologique et dyslexie de surface : un trouble spécifique en lecture de mots irréguliers avec une lecture de pseudomots préservée et vice-versa.

Ce modèle est donc très puissant et très prometteur mais pourrait encore être amélioré par l'implémentation d'un système sémantique ainsi que par l'extension aux mots polysyllabiques et à d'autres langues que l'anglais. Nous allons maintenant présenter un modèle qui permet la lecture de mots polysyllabiques.

**Le modèle multi-traces (Ans et coll. 1998)** . Comme les modèles à deux voies, le modèle multi-trace postule que 2 types de procédures, l'une globale et l'autre analytique, sont nécessaires pour pouvoir prononcer toutes les séquences de lettres. Toutefois, il ne peut être considéré comme une nouvelle version du modèle à deux routes pour trois raisons principales. Premièrement, les procédures globale et analytique impliquent des principes computationnels similaires : la voie analytique n'intègre pas de système de règles de conversion graphème/phonème mais la correspondance entre orthographe et phonologie émerge de l'apprentissage des mots entiers et des syllabes de ces mots. D'autre part, les 2 mécanismes n'opèrent pas en parallèle, la procédure globale intervient toujours la première et la procédure analytique se met en place uniquement quand la précédente a échoué. Finalement, les 2 procédures ne sont pas a priori dédiées à un type de stimuli (mots ou pseudomots) et ne diffèrent que par le type d'attention visuelle qu'elles impliquent. Seuls les items reconnus comme familiers par le système sont traités globalement. Les séquences de lettres qui ne sont pas familières ne peuvent pas être traitées de cette façon et sont donc traitées par la voie analytique.

Ce réseau est composé de 4 couches d'unités : deux couches orthographiques à l'architecture similaire, une couche phonologique de sortie et une couche intermédiaire de mémoire épisodique. Le codage de l'entrée orthographique dépend de la voie de lecture utilisée et dès lors du point de focalisation de la fenêtre visuo-attentionnelle. En mode global, la fenêtre visuo-attentionnelle englobe le mot. Les unités orthographiques codant pour chacune des lettres du mot ainsi que celles codant pour les espaces initial et final sont donc



activées et engendrent l'activation simultanée de la forme phonologique. En mode analytique, en revanche, la fenêtre visuo-attentionnelle comprend seulement une partie réduite de la séquence de lettres, le reste des lettres étant codé comme contextuel. Les syllabes sont successivement présentées à la couche orthographique d'entrée et leur correspondance phonologique devient disponible. La présentation d'un mot ou d'une syllabe de ce mot au système engendre la création d'une trace en mémoire épisodique. L'apprentissage consiste à renforcer les poids de connexion entre cette unité et les unités actives dans les deux couches orthographiques et la couche phonologique. Ce modèle donne de bons résultats pour simuler la lecture normale et les deux types de dyslexies. Il a pour principal avantage de permettre la lecture de mots et de pseudomots polysyllabiques contrairement aux précédents qui se limitaient aux mots monosyllabiques. Un autre atout de ce modèle est qu'il prend en compte les processus visuo-attentionnels comme partie intégrante de la procédure de lecture.

Maintenant que nous avons présentés les différents modèles de lecture, nous allons voir quelles sont les zones cérébrales impliquées dans l'activité de lecture.

### **2.4.2 Aspects neurolinguistiques du langage**

Comme nous l'avons montré pour les mécanismes de lecture, l'observation de patients a souvent aidé à la compréhension du fonctionnement cérébral. La neuropsycholinguistique est l'étude des aspects pathologiques du langage, dus à une dégénérescence ou une lésion focale du système nerveux central. Parmi les troubles acquis du langage, on distingue généralement les atteintes du langage oral, appelées aphasies, des atteintes du langage écrit : les alexies. De plus, le trouble peut concerner la compréhension, la production ou les 2 versants. La neuropsycholinguistique constitue une importante source d'information sur l'organisation neuronale du langage, permettant de mettre en relation un trouble particulier du langage avec la lésion d'une zone particulière du cortex cérébral. La mise en relation de déficits spécifiques et différenciés et des lésions associées a notamment permis d'aider à la compréhension du fonctionnement cérébral.

### 2.4.2.1 Localisation des aires cérébrales du langage au XIX<sup>ème</sup> siècle

Dès 1861, un neurochirurgien français, Paul Broca (1824-1880), fut le premier à localiser dans le cerveau ce qu'il appelait « la faculté du langage articulé ». Il rapporte une étude post-mortem d'un patient ayant des problèmes d'articulation et d'expression du langage, sans paralysie des muscles bucco-phonatoires, et avec une compréhension relativement épargnée (Broca 1861). Ce patient avait, entre autres, une lésion corticale située dans le tiers inféro-externe du cortex pré-moteur constituée du pied et du cap de la troisième circonvolution frontale gauche (gyrus frontal postérieur inférieur gauche, correspondant aux aires de Brodmann BA 44/45) (voir figure 2.10). L'aire décrite, appelée depuis « aire de Broca », fut associée par déduction à la production de la parole. On lui attribue généralement un rôle central dans l'organisation articulée du langage oral. La destruction complète ou partielle de cette zone, souvent accompagnée de lésions des aires adjacentes, entraîne une aphasie de Broca ou aphasie motrice. Dans ce type d'aphasie, la compréhension du langage oral et écrit est relativement préservée tandis que l'expression est laborieuse : le débit est ralenti, le vocabulaire est restreint, l'articulation est difficile et les structures grammaticales sont simplifiées ou absentes (agrammatisme).

Quelques années plus tard, Carl Wernicke (1848-1905) identifia par une étude post-mortem une deuxième aire apparemment dédiée au langage. Ce neurologue allemand présenta le cas d'un patient aphasique avec un déficit touchant principalement la compréhension du langage (Wernicke 1874). La lésion fut identifiée dans le cortex associatif auditif, en dessous et en arrière du cortex auditif primaire. Cette zone, appelée aujourd'hui « aire de Wernicke » est constituée de la moitié postérieure de la 1<sup>ère</sup> circonvolution temporale gauche (BA 22) ainsi que du « planum temporale » (BA 42). Toutefois, la taille et la délimitation de cette zone peuvent varier sensiblement d'un individu et d'un auteur à l'autre. Cette aire est considérée comme mettant en oeuvre un mécanisme central dans la compréhension du langage et comme lieu de stockage de la forme phonologique des mots. Sa perte entraînant une aphasie de Wernicke ou aphasie sensorielle, caractérisée par un déficit du décodage des informations verbales et par un désordre expressif. La production orale est entâchée de nombreuses paraphrasies, souvent de type phonémique mais sans altération de l'articulation.

Par ailleurs, Wernicke postula l'existence d'une connexion directe entre les aires de Broca et Wernicke, et qu'une lésion de la matière blanche connectant ces deux aires cérébrales provoquerait une incapacité à répéter les mots entendus, mais avec

une compréhension et une production de la parole intactes. Ce type de syndrome de dysconnexion, appelé « aphasie de conduction », fut rapporté par le médecin allemand Ludwig Lichtheim en 1885 (Lichtheim 1885).

Une connexion privilégiée entre le lobe frontal postérieur et le lobe temporal supérieur avait déjà été décrite par Karl Burdach (médecin allemand), et fut confirmée ensuite par Joseph Déjerine (neurologue français) qui nomma ce « chemin » le faisceau arqué de Burdach (Déjerine, 1892). En 1885, Lichtheim proposa aussi une extension du modèle existant « Broca - faisceau arqué - Wernicke », grâce à l'observation de différents symptômes d'aphasie. Il fit l'hypothèse d'une « voie » additionnelle entre les aires de Broca et Wernicke au travers d'un troisième « centre » théorique, dédié au traitement sémantique : le « concept center ».

En ce qui concerne la lecture, Déjerine (1849-1917) fut le premier à publier deux cas de patients souffrant d'alexie à la suite d'accidents vasculaires cérébraux. L'un avait perdu totalement les capacités de compréhension et d'expression du langage écrit (Déjerine 1891) à la suite d'une petite lésion, « pas plus grosse qu'une pièce de 5 francs » à la jonction temporo-occipitale de l'hémisphère gauche (région dénommée gyrus angulaire). Déjerine proposa donc que le gyrus angulaire gauche est associé à la mémoire des formes visuelles des mots. L'autre sujet présentait également une perte de la compréhension du langage écrit mais chez celui-ci, la capacité d'écriture était préservée. Etant donné que l'orthographe des mots n'était pas affectée, Déjerine fit l'hypothèse que le gyrus angulaire n'était pas lésé mais qu'il était privé d'afférences visuelles. En effet, l'atteinte fut localisée, post-mortem, au niveau du cortex occipital interne gauche et à la partie la plus ventrale du splénium du corps calleux. Déjerine parla pour ce patient de « cécité verbale pure ». Par la suite, ces tableaux furent appelés alexies avec ou sans agraphie, et cette dernière fut attribuée à une dysconnexion entre le gyrus angulaire gauche et le cortex visuel (Damasio et Damasio 1983).

Ces différentes observations permirent de mettre en évidence que la répétition de mots entendus impliquerait des traitements acoustiques dans le cortex auditif primaire, la connexion aux images auditives de la parole dans l'aire de Wernicke et aux images motrices de la parole dans l'aire de Broca, et enfin la génération de la parole dans le cortex moteur (gyrus précentral). La lecture d'un mot impliquerait quant à elle le cortex visuel pour le traitement visuel, et le gyrus angulaire, siège de la mémoire des formes visuelles des mots. Les connexions entre le gyrus angulaire et l'aire de Wernicke permettraient de faire le lien entre la forme visuelle d'un mot

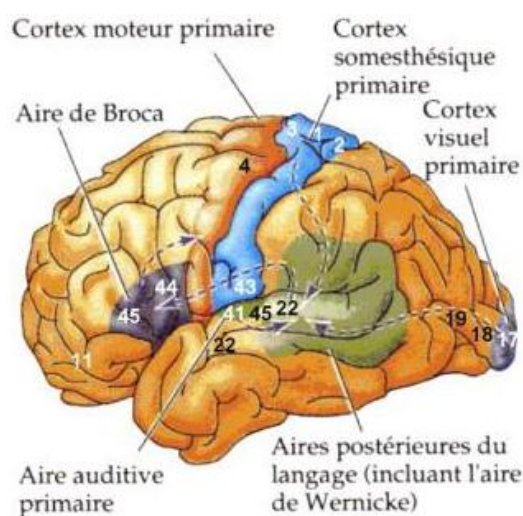


FIGURE 2.10 – Principales aires cérébrales du langage situées dans l'hémisphère gauche

et la forme auditive correspondante, indispensable à la production de parole lors de la lecture à voix haute, sous-tendue par l'aire de Broca (Geschwind 1965).

#### 2.4.2.2 Neuropsycholinguistique et déficit de lecture

Depuis Broca, Wernicke et Déjerine qui étaient limités à la dissection post-mortem, les techniques ont évolué et permis d'accroître les connaissances sur la localisation des aires langagières. Nous savons aujourd'hui que les déficits de compréhension du langage oral et écrit, sont associés à de larges lésions temporo-pariétales gauches, comprenant le gyrus temporal supérieur postérieur (aire de Wernicke), les lobes temporaux médian et inférieur ainsi que les gyri angulaire et supramarginal du lobe pariétal gauche (Alexander et coll. 1989, Déjerine 1892, Geschwind 1965, Hart et Gordon 1990, Kertesz et coll. 1982). Voyons à présent ce qu'il en est des atteintes associées aux déficits acquis de lecture. Dans l'alexie phonologique, caractérisée par un traitement phonologique déficitaire et donc par une difficulté majeure à lire les pseudomots sans trouble de la voie lexicale de lecture (Beauvois et Dérouesné 1979, Dérouesné et Beauvois 1979), des lésions temporo-pariétales et frontales gauches ont été mises en évidence. Les difficultés de lecture de mots irréguliers observées dans l'alexie de surface sont plutôt rapportées suite à une atrophie du lobe temporal antéro-latéral (Patterson et Hodges 1992). La dyslexie profonde combine les symptômes des alexies phonologiques et de surface avec des difficultés à lire des pseudomots et les mots abstraits (plus que les mots

concrets) et des erreurs sémantiques (ex : « train » lu « avion »). Elle est souvent considérée comme une forme d'évolution des aphasies de Broca. Par ailleurs, chez les patients aphasiques de Broca lésés au niveau de l'aire frontale de Broca (BA 44/45), un trouble de la lecture peut se présenter en parallèle du langage expressif, on parle alors d'alexie frontale ou antérieure. Quand la lésion implique la région angulaire gauche (BA 39), on retrouve l'alexie centrale ou alexie avec agraphie. Le trouble est ici tant au niveau de la lecture que de l'écriture mais le langage oral est préservé. Si la lésion s'étend au gyrus temporal postérieur, une aphasie sensorielle peut y être associée. L'alexie sans agraphie, appelée aussi alexie agnosique ou cécité verbale pure, est liée à une lésion occipito-temporale gauche (Price et Mechelli 2005) associée à une atteinte du splenium du corps calleux (i.e. sa partie toute postérieure). Le tableau clinique consiste en une incompréhension du langage écrit (des lettres et/ou des chiffres), une hémianopsie latérale homonyme droite et souvent des troubles de la reconnaissance d'autres symboles graphiques (pictogrammes) et une agnosie des couleurs. L'alexie « pure », bien que moins sévère que celle-ci, présente de nombreuses caractéristiques communes avec l'alexie agnosique : l'absence de troubles du langage oral exceptées quelques difficultés d'évocation verbale, la conversion de la stratégie perceptive de la lecture, une écriture spontanée et sous-dictée préservée ainsi que l'épellation mais une perturbation de la copie. Dans l'alexie pure, les lésions sont occipitales (lobule lingual) et calleuses, et empêchent les entrées visuelles arrivant uniquement au lobe occipital droit (en raison de l'hémianopsie droite) d'être transmises aux centres du langage situés dans l'hémisphère gauche. Finalement, certains patients hémiparétiques souffrent d'alexie périphérique : la négligence d'un hémichamps de leur environnement s'observe dans leur activité de lecture également. La négligence peut concerner la partie gauche (ou droite) du texte ou des mots (Hillis et Caramazza 1991, Luo et coll. 1998).

Comme nous venons de le voir, les études de lésions cérébrales et des déficits ont apporté de nombreuses connaissances sur le langage et ses corrélats cérébraux. Toutefois, leur portée est limitée pour plusieurs raisons :

- La complexité des profils neuropsychologiques : une lésion engendre souvent une constellation de déficits plutôt qu'un déficit isolé.
- La variabilité des déficits en fonction des compensations post-lésionnelles. Après un accident cérébral, deux types de compensations peuvent être observées : la mise en place de stratégies par le patient (la palliation cognitive) et

des changements au niveau de la neuro-anatomie fonctionnelle (la réorganisation cérébrale).

- Certaines régions très résistantes aux dommages ischémiques ne peuvent dès lors pas être étudiées.
- L'impossibilité de distinguer si le déficit est lié à la région lésée ou à une dysconnexion avec une aire épargnée. Tout ce qui peut être déduit de l'étude d'un déficit lésionnel est que les systèmes neuronaux intrinsèques à l'aire lésée, ou les connexions passant par cette aire, sont nécessaires à la fonction perdue.

Aujourd'hui, nous disposons d'autres techniques permettant d'étudier les corrélats cérébraux impliqués dans certaines activités cognitives. Ce sont les techniques d'imagerie cérébrale qui sont de plus en plus performantes et ne cessent d'évoluer.

#### **2.4.2.3 Les techniques d'imagerie cérébrale**

Depuis plus de 20 ans, les techniques d'imagerie cérébrale sont utilisées chez des sujets psychologiquement et physiologiquement sains pour comprendre le fonctionnement anatomique du langage (et des autres activités cognitives). Ces méthodes, relativement non invasive, permettent d'observer l'activité du cerveau « in vivo ». Plus précisément, l'imagerie fonctionnelle permet d'étudier les spécificités de régions cérébrales naturellement épargnées par les lésions, ou bien avec une activité préservée à la suite d'un dommage, du fait de la réorganisation cognitive ou neuronale. Elle permet aussi d'identifier des sites fonctionnant anormalement en l'absence de toute lésion, ou encore des lésions étendues qui ne touchent pas qu'une seule zone fonctionnelle. Contrairement aux études lésionnelles, ces techniques ne sont pas confinées à une hypothèse de ségrégation fonctionnelle et tiennent compte au contraire de la spécialisation fonctionnelle émergeant de l'interaction entre deux ou plusieurs aires (intégration fonctionnelle). Toutefois, les études lésionnelles ne sont pas abandonnées pour autant et sont complémentaires des méthodes d'imagerie. Ces dernières permettant d'identifier l'ensemble des régions impliquées dans une tâche par rapport à une autre tandis que les modèles de déficits lésionnels permettent d'identifier quelles régions ou connexions sont indispensables à une composante particulière de la tâche.

Parmi les techniques d'imagerie cérébrale, on en distingue deux grandes familles : les techniques électromagnétiques et les techniques métaboliques ou hémodynamiques. Les premières fournissent une information directe sur l'activité synaptique

des neurones, on y retrouve les potentiels évoqués (PE) et la magnétoencéphalographie (MEG). Les secondes comprennent l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et la tomographie par émissions de positons (TEP), elles procurent des informations indirectes sur l'activité cérébrale en mesurant les variations du débit sanguin induites par l'activité neurale. Ces méthodes sont complémentaires car elles fournissent des résultats de sensibilité variable. Les PE et la MEG ont une résolution temporelle très précise (de l'ordre de la milliseconde) mais une résolution spatiale moindre (de l'ordre de plusieurs centimètres) du fait de leur enregistrement en surface. Ils sont donc utiles pour comprendre la chronologie des événements cérébraux mais sont peu informatifs sur les activations profondes. L'IRMf et la TEP ont, en revanche, une résolution spatiale plus fine (de l'ordre du millimètre) permettant une localisation précise mais une résolution temporelle de l'ordre de la seconde, insuffisante au regard du « timing » cognitif.

**Les potentiels évoqués.** Cette technique, peu coûteuse et relativement simple d'utilisation, est basée sur un enregistrement de l'ElectroEncéphaloGramme (EEG). Elle consiste à enregistrer les potentiels électriques générés par les neurones en plusieurs points de la surface du crâne grâce à des électrodes (entre 32 et 256) fixées sur le cuir chevelu et reliées à un potentiomètre sensible. Les PE (ou ERP en anglais pour « Event-Related Potentials ») peuvent être définis comme les modifications de l'activité électrique cérébrale consécutives à l'application d'une stimulation. La moyenne des mesures lors d'essais successifs permet d'extraire la réponse évoquée par une stimulation en s'affranchissant de l'activité électrique spontanée indépendante de la stimulation (bruit physiologique). Les moyennes résultantes sont des courbes de différences de potentiel en fonction du temps. Les signaux obtenus sont une succession de courbes dont les sommets et les déflexions sont appelés composantes et sont supposés refléter une activation maximale d'un processus particulier. Ces composantes sont libellées d'après leur polarité (Positive=P ou Négative=N) suivie d'un nombre qualifiant leur ordre d'apparition (1,2,...) ou le temps d'occurrence moyen (en millisecondes) après l'apparition du stimulus chez le sujet « sain » (180, 300,...). (Voir figure 2.11)

Elles peuvent varier en latence et en amplitude en fonction du type de stimulation. Comme nous l'avons déjà signalé, l'enregistrement se fait à la surface du scalp et il n'y a pas nécessairement correspondance entre un maximum

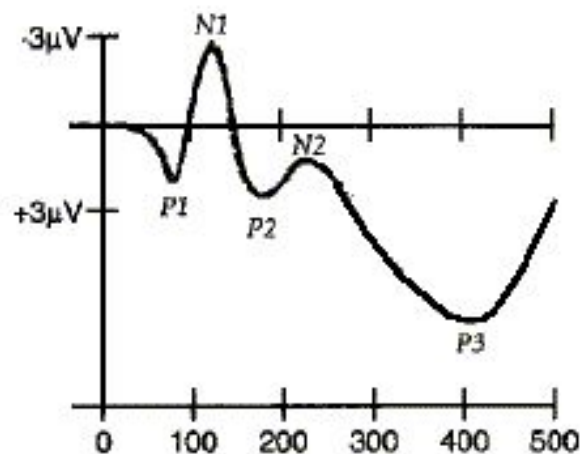


FIGURE 2.11 – Principaux composants des potentiels évoqués

de potentiel à cet endroit et l'activité du cortex sous-jacent étant donnée la diffusion dans la boîte crânienne.

**La magnétoEncéphaloGraphie (MEG)** enregistre les champs magnétiques induits par les courants générés par les neurones lors d'une tâche donnée. Des capteurs regroupés dans un casque sont approchés du crâne du sujet pour enregistrer les variations de champs (voir figure 2.12). Ces variations, de l'ordre



FIGURE 2.12 – Dispositif de magnétoencéphalographie

de 10-13 TESLA, sont enregistrées à l'aide de bobines réceptrices de flux couplées à des transformateurs de flux (appelés « SQUID »). Cette méthode est



coûteuse et donc plus rarement utilisée que les potentiels évoqués. Elle comporte toutefois de nombreux avantages : la magnétoencéphalographie permet un enregistrement des réponses évoquées de manière beaucoup plus focale et les signaux magnétiques sont moins distordus par les tissus cérébraux que les signaux électriques. Cette technique est aussi moins sensible aux bruits extérieurs, entre autre parce que l'appareillage est systématiquement contenu dans une cage de Faraday. L'observation des résultats de MEG est très similaire à celle des résultats d'EEG, les pics observés étant notés « M » suivi de la latence de l'événement.

**La tomographie par émissions de positons (TEP).** Cette technique mise au point en 1972 est basée sur l'idée que toute activité neuronale est associée à une augmentation du débit ou du volume sanguin dans la région d'activité. Elle consiste à injecter dans le sang une petite quantité d'un traceur radioactif qui va parvenir au cerveau. Le rayonnement émis par ces traceurs est enregistré par des capteurs externes et permet de connaître la distribution du sang dans les différentes parties du cortex. Les différences entre les niveaux d'activité des différentes zones se traduisent par des couleurs divergentes sur l'image (voir figure 2.13) . Les traceurs les plus fréquemment utilisés sont

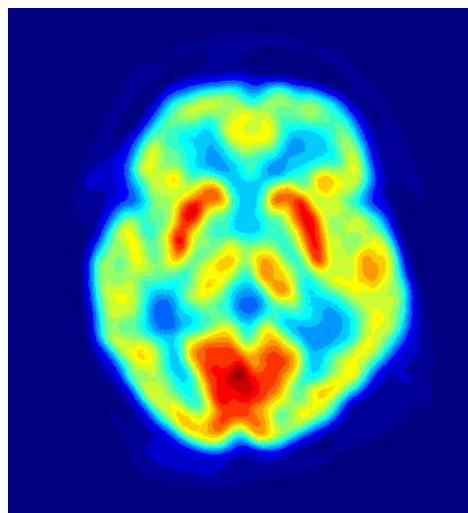


FIGURE 2.13 – *Vue axiale d'un cerveau par topographie à émissions de positons*

l'eau marquée à l'Oxygène 15, pour la mesure du débit sanguin, et le deoxyglucose marqué au Fluor 18, pour la mesure du métabolisme du glucose. Cette méthode comporte deux inconvénients majeurs : son caractère invasif avec les multiples injections de produit radioactif et la durée d'acquisition

assez longue (90s par ex.) qui ne permet pas le recueil de données événementielles.

**L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).** Cette méthode, moins invasive que la précédente, est apparue au début des années 90. Elle fournit des images tridimensionnelles en exploitant l'hémoglobine dont les propriétés magnétiques diffèrent selon que cette molécule est liée ou non à l'oxygène. L'activité du cerveau est mesurée en réalisant des images reflétant le contraste entre les régions au flux sanguin normal et celles où celui-ci est accru (voir figure 2.14) . Ce contraste reflète des modifications hémodynamiques lo-

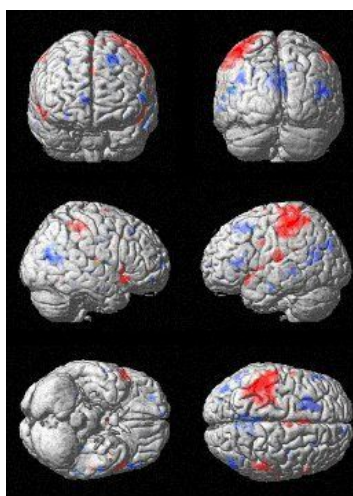


FIGURE 2.14 – Activations cérébrales observées à partir de la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

cales, mais ne fournit pas de réponse sur la relation entre ces variations et l'activité neuronale. Les origines neuronales exactes de l'activation cérébrale mise en évidence par l'IRMf ne sont donc pas parfaitement déterminées. Cette technique a pour avantages de présenter une résolution spatiale aussi fine que celle de la TEP et une meilleure résolution temporelle. Elle permet donc l'utilisation de paradigmes classiques bloqués (comme en TEP) mais également de paradigmes événementiels. De plus, la superposition entre les images anatomiques et fonctionnelles est facilement réalisable car enregistrée avec le même matériel et souvent dans les mêmes conditions.

D'autres techniques d'investigations, que nous ne détaillerons pas dans ce travail, sont utilisées pour étudier les corrélats cérébraux des fonctions langagières : l'IRM de diffusion, la Stimulation Magnétique Transcrânienne (TMS) ou l'implantation d'électrodes intracérébrales.

#### 2.4.2.4 Corrélats neuroanatomiques du traitement du mot écrit

L'identification d'un mot écrit engendre plusieurs niveaux de traitement soutendus par des zones cérébrales différentes. L'essor des techniques d'imagerie a permis de préciser le dérours temporel de ces traitements et de spécifier les régions impliquées aux différentes étapes du processus.

##### **Le traitement visuel « de bas niveau »**

Lors de la présentation visuelle d'un stimulus langagier, le premier traitement consisterait en une analyse perceptive primaire des traits. Les premières activations sont observées dans les aires visuelles primaires (V1) bilatérales, appelées aussi cortex strié (Petersen et coll. 1988). Ces aires sont connues pour être impliquées dans le traitement visuel de « bas niveau » et leur activation n'est pas spécifique à des stimuli orthographiques (Helenius et coll. 1999, Tarkiainen et coll. 1999).

##### **Le traitement pré-lexical**

Après une première analyse primaire des traits, le traitement devient plus spécifique aux caractères linguistiques et l'activation se propage dans les aires associatives visuelles, autrement nommées le cortex extra-strié. Selon les études, cette activation est tantôt observée bilatéralement tantôt uniquement à gauche (Cornelissen et coll. 2003, Howard et coll. 1992, Petersen et coll. 1988). Elle est spécifique aux stimuli du langage car elle s'observe à la fois pour les mots et les pseudomots mais pas pour des caractères non linguistiques ou une croix de fixation présentés visuellement.

Plusieurs études se sont attachées à comprendre cette activation spécifique aux mots et aux pseudomots et ont essayé de préciser quels étaient les facteurs qui pouvaient l'influencer. Ainsi, Indefrey et coll. (1997) ont postulé que, plus que le statut lexical, ce seraient la longueur et la complexité des stimuli linguistiques qui moduleraient l'activation du cortex visuel extra-strié médial. De plus, et étant donné que l'activation dans les aires primaires est modulée par le taux de présentation du stimulus (Fox et Raichle 1985), la question s'est posée pour les aires associatives de savoir si certains critères de présentation tels que son temps ou le taux de répétition pouvaient jouer un rôle dans leur activation. Il a dès lors été mis en évidence que cette dernière dépendait du taux et du temps de présentation (Price et Friston 1997, Price

et coll. 1996). A la même période, d'autres études ont porté sur les différences d'activation entre les hémisphères suggérant que le traitement effectué par l'un et l'autre différait. Le cortex extra-strié droit serait impliqué dans le traitement de la forme globale du mot tandis que les aires analogues gauches contribueraient à un traitement plus localisé des stimuli linguistiques.

Cependant, l'idée d'un traitement uniquement 'orthographique' par le cortex extra-strié est aujourd'hui remise en question. En effet, de nombreuses études en IRMf ont mis en évidence des effets pré-lexicaux dès cette phase d'activation mais les résultats semblent dépendre des tâches utilisées. De fait, dans une tâche de décision lexicale, on a observé des activations plus importantes pour les mots (en comparaison aux pseudomots) dans des régions occipito-temporales bilatérales (Fiebach et coll. 2002) ou gauches (Binder et coll. 2003) pour les mots en comparaison aux pseudomots. Dans d'autres études où le sujet avait pour seule consigne de lire silencieusement (Kronbichler et coll. 2004, Mechelli et coll. 2003), les activations se sont révélées plus importantes dans le gyrus fusiforme gauche (appartenant au réseau extra-strié) pour les pseudomots que pour les mots. Kronbichler et coll. (2004) explique cette différence de résultats par la nature de la tâche : en décision lexicale, le choix de la réponse « non » en présence de pseudomots pourrait être basé sur un traitement visuel-orthographique superficiel tandis que la réponse « oui » en présence d'un mot nécessite l'identification de celui-ci. Le réseau extra-strié, dont le gyrus fusiforme, fournirait le code d'accès aux informations sémantiques et phonologiques de plus haut niveau représentées dans le gyrus temporal moyen postérieur gauche, plus activé pour les mots que pour les pseudomots. Finalement, d'autres résultats portant sur les lettres vont dans le sens de cette hypothèse d'un traitement pré-lexical du cortex extra-strié. Garrett et coll. (2000) ont mis en évidence, lors d'une étude en TEP, une activation de l'aire BA37 gauche directement corrélée aux performances des sujets dans une tâche de décision de lettre. Utilisant l'IRMf, des résultats similaires ont été observés avec une activation de BA37 spécifique aux lettres latines dans une tâche de classification de lettres latines, coréennes et de formes géométriques (Pernet et coll. 2005).

### **Conversion graphème-phonème**

Avant de passer au traitement phonologique du mot, il est important de préciser que dans le cas particulier de la lecture de pseudomots ou de mots

de très basses fréquences, une conversion des graphèmes en leur phonème correspondant est nécessaire. Dans les études de décision lexicale citées dans le paragraphe précédent (Binder et coll. 2003, Fiebach et coll. 2002), certaines régions se sont révélées plus activées pour les pseudomots ou les mots de basse fréquence et les auteurs ont interprété cette différence comme reflétant le processus de conversion graphème-phonème. Les aires mises en évidence dans ces deux études sont le pars opercularis (BA44) et le pars triangularis gauche, l'insula antérieure, le noyau caudé, le thalamus, le cortex pré-moteur, l'aire motrice supplémentaire bilatérale, le sulcus frontal inférieur droit et le gyrus frontal moyen antérieur droit. Une méta-analyse de 35 études de neuro-imagerie a établi que cette conversion graphème-phonème reposerait sur les aires temporales supérieures gauches ainsi que sur le gyrus supra-marginal gauche et le pars opercularis gauche du fait de l'augmentation de la charge en mémoire de travail (Jobard et coll. 2003).

### Traitements phonémique et phonologique

Les premières étapes corticales de la perception auditive du langage mettent en jeu de manière bilatérale le cortex auditif temporal supérieur. Les études lésionnelles sur des patients souffrant de surdité verbale ont permis de mettre en évidence le caractère uni-modal des gyri temporaux supérieurs qui ne traiteraient que l'information auditive. En effet, les difficultés rencontrées par des personnes lésées à ce niveau ne concernent que la compréhension de mots présentés oralement alors que la production orale et le langage écrit sont préservés. Les études d'imagerie concordent étant donné que la seule région plus activée en répétition de mots qu'en lecture est localisée à la surface latérale de ce gyrus temporal supérieur gauche.

Plusieurs études se sont attachées à préciser les régions du cortex temporal impliquées dans le traitement de la parole et de comprendre leurs différentes fonctions. La structure corticale activée dans le traitement du langage s'étendrait dans les deux hémisphères sur plus de 4 cm dans le gyrus temporal supérieur de part et d'autre du gyrus de Heschl, incluant vers le bas le sillon temporal supérieur. Elle respecte des deux côtés le cortex auditif primaire et la branche montante du planum temporal. Le cortex auditif est par définition sensible au langage, mais il est aussi spécifique puisqu'il n'est activé ni par les tons purs, ni par l'attention portée à des composants élémentaires du son, tels que son intensité, sa hauteur, ou sa durée (Samson et coll. 2001).

Toutefois, cette spécificité ne serait pas complète puisque certains auteurs ont observé que cette aire s'active aussi lorsqu'il s'agit de dénommer des sons de l'environnement (Price et coll. 2003). De plus, Belin et coll. (2000) ont montré que cette région était plus activée lorsque les sujets entendaient des sons vocaux non langagiers tels que des rires ou des éternuements que pour des sons non vocaux tels que des applaudissements ou des claquements de doigts. Au vu de ces résultats, l'activation de cette aire durant le traitement auditif de mots a été interprétée par Price et coll. (2003) comme reflétant un traitement acoustique suscité par le traitement d'éléments communs aux sons langagiers et aux sons de l'environnement mais pas aux bruits.

D'autres études de neuro-imagerie ont permis de comprendre plus spécifiquement le rôle de cette région et ont mis en évidence qu'une partie de ce gyrus temporal supérieur gauche et la partie supérieure de la scissure temporale supérieure - le gyrus de Heschl et le planum temporal - étaient fortement impliquées dans la représentation de l'information phonémique sublexicale. En effet, en comparant les activations dans une tâche de catégorisation utilisant des stimuli phonémiques ou non phonémiques appariés, des auteurs ont observés une activation plus importante de ces zones pour la catégorisation phonémique (Liebenthal et coll. 2005). Par ailleurs, une activation bilatérale des sulci temporaux supérieurs plus importante à l'écoute de la parole qu'à l'écoute de sons a fait postuler que cette région était spécifique au traitement de la parole sur des bases acoustiques et non pas linguistiques. De plus, il n'y avait pas de différence d'activation de ces zones entre des mots, des pseudomots ou des mots inversés (Binder et coll. 2000).

Contrairement aux parties que nous venons d'évoquer, des régions inférieures de la scissure temporale supérieure et le gyrus temporal médian, également activés en répétition de mots, comprendraient des aires polymodales recevant des projections visuelles, somato-sensorielles et auditives. Ces aires étant probablement les sites d'une analyse linguistique de plus haut niveau des phonèmes perçus.

En plus des activations du gyrus temporal supérieur et dans une moindre mesure, Démonet et coll. (1992) ont mis en évidence une activation de l'aire de Broca. Cette région, connue comme le siège de la production du langage, s'active aussi dans des tâches de jugement de rimes (Paulesu et coll. 1993, Zatorre et coll. 1996) ou de lecture de mots irréguliers et de pseudomots comparés à des mots réguliers (Herbster et coll. 1997). Cette activation reflète,

d'après les auteurs, l'accès à la représentation articulatoire des phonèmes, étape indispensable à la réalisation d'un décodage des sons du langage (Fiez et Petersen (1998) pour revue).

Reprenant cette conception suite à une étude en TEP sur la mémoire de travail verbale, Paulesu et coll. (1993) ont proposé que l'aire de Broca (aire de Brodman 44) formerait, avec les gyri temporaux supérieurs (AB 22/42), les gyri supra-marginaux (AB 40) et l'insula, la boucle articulatoire telle qu'envisagée par Baddeley dans son modèle (Baddeley 1986). Ils précisent que les gyri supra-marginaux étant activés dans les tâches de mémoire phonologique mais pas dans celles de rimes, ils seraient la localisation principale du stockage phonologique. L'activation importante de l'aire de Broca dans les différentes tâches est interprétée comme indiquant le rôle primordial de cette zone dans la répétition sub-vocale. Finalement, les gyri temporaux supérieurs activés dans des tâches passives de perception de phonèmes et en jugement de rimes sont considérés comme probablement impliqués dans le traitement phonologique indépendamment des processus mnésiques.

### **Le traitement lexical des mots**

Dès le 19<sup>ième</sup> siècle, les études post-mortems de Broca, Wernicke et Lichtheim sur les patients aphasiques et celles de Déjerine sur des alexiques ont permis de mettre en évidence que les régions cérébrales impliquées dans le langage différaient en fonction des modalités d'entrée et de sortie. Nous allons donc analyser d'une part le traitement lexical des mots entendus et d'autre part celui des mots lus. Selon le modèle neurologique du 19<sup>ième</sup> siècle, adapté par Price (2000), les représentations auditives des mots seraient stockées dans l'aire de Wernicke tandis que leurs représentations visuelles siègeraient dans le gyrus angulaire.

En ce qui concerne la modalité auditive, de nombreuses études d'imagerie ont confirmé cette activation plus importante de l'aire de Wernicke à l'écoute de sons de paroles comparés à des sons non langagiers (Binder et coll. 2000, Mummery et coll. 1999). En revanche, aucune différence d'activation n'a été observée dans cette aire à l'écoute de sons vocaux non linguistiques (éternuements, rires, etc.) ou de sons de l'environnement (cloche, téléphone, animaux, etc.) comparés à des sons de parole modifiée au niveau de l'amplitude et des sons langagiers brouillés (mots inversés) (Belin2000). Ces résultats ont amené les auteurs à considérer cette aire comme le siège du lexique mental auditif.

Néanmoins, certaines recherches ont observé une activation de cette aire dans des tâches n'impliquant pas des sons de parole. Celsis et coll. (1999) ont effectué une tâche d'écoute de sons et de syllabes, standards et déviants, et ont obtenus des activations de l'aire de Wernicke à l'écoute des deux sortes de syllabes, résultat en accord avec les études précédentes. En revanche et de façon plus surprenante, ils ont également mis en évidence une activation à l'écoute des sons déviants. Ils l'ont interprétée comme une implication dans la détection de changement acoustique de parole et de non parole. Dans le même ordre d'idées, certains auteurs ont montré une activation de cette zone dans une tâche visuelle dans laquelle ils faisaient varier le degré de prédictibilité. Ce dernier était négativement corrélé avec le niveau d'activation de l'aire de Wernicke (Bischoff-Grethe et coll. 2000).

Ces résultats soulignent donc que l'aire de Wernicke ne serait pas uniquement le lieu de stockage des représentations auditives des mots. Price et coll. (2003) ont proposé 3 hypothèses pour expliquer cela. D'une part, il se peut que le nom d'aire de Wernicke soit parfois utilisé abusivement pour des zones proches dans cette région temporale supérieure postérieure. De plus, il est également possible qu'une même aire joue des rôles différents en fonction des régions avec lesquelles elle interagit. Pour l'aire de Wernicke plus spécifiquement, elle pourrait être impliquée dans le traitement auditif des mots quand elle est co-activée avec l'aire de Broca mais avoir des fonctions différentes quand elle est co-activée avec d'autres régions. Des études supplémentaires sont nécessaires pour préciser cette question mais il est important de signaler que ces deux hypothèses ne sont pas exclusives et pourraient toutes deux expliquer une part des activations dans des tâches non langagières.

Voyons à présent ce qu'il en est d'une éventuelle aire dédiée au stockage des représentations visuelles des mots. D'après ses observations de patients alexiques, Déjerine a postulé que la mémoire de la forme visuelle des mots est située dans le gyrus angulaire gauche. Les études d'imagerie effectuées depuis le siècle dernier ayant montré des résultats divergents en fonction des sujets, du type de mots, du taux et de la durée de présentation, plusieurs localisations cérébrales sont envisagées comme lieu de stockage de la forme visuelle des mots. Concernant le gyrus angulaire, certaines recherches ont observé son activation en lecture silencieuse de mots et plus particulièrement quand ceux-ci formaient des phrases. Il semblerait que son rôle soit plutôt



d'ordre sémantique, laquelle est plus proéminente en lecture de phrases.

En 1988, Petersen et ses collaborateurs (Petersen et coll. 1988) ont mis en évidence, dans une étude en TEP, que la présentation visuelle d'un mot ou d'un pseudomot activait le cortex extra-strié médian gauche qui n'était pas activé par des séquences de lettres ne respectant pas les règles orthotactiques ou des caractères non langagiers. Ils en conclurent que cette région joue un rôle primordial dans l'accès au lexique visuel. Dans les années qui suivirent, d'autres auteurs n'obtinrent pas cette activation dans une tâche de lecture à haute voix de mots comparée à la présentation visuelle de caractères non linguistiques pour laquelle les sujets devaient prononcer toujours le même mot (Howard et coll. 1992). Par ailleurs, certaines études ont montré une activation de ce cortex extra-strié médian gauche en présentation visuelle d'objets ou de stimuli complexes (Indefrey et coll. 1997, Moore et Price 1999).

### **Le traitement sémantique**

Lors de la présentation auditive de mots, l'accès au sens active les cortex gauches temporal postérieur moyen, temporo-pariétal postérieur et temporal antérieur inférieur.

Dans des tâches de lecture silencieuse, certaines études ont montré une activation du gyrus angulaire en lecture de phrases (Bavelier et coll. 1997, Bottini et coll. 1994) tandis que cette activation n'est pas toujours retrouvée en lecture de mots isolés (Beauregard et coll. 1997, Brunswick et coll. 1999, Herbster et coll. 1997, Moore et Price 1999, Rumsey et coll. 1997). Cette activation du gyrus angulaire a dès lors été interprétée comme étant en lien avec un accès à la sémantique qui serait plus saillant en lecture de phrases ou de mots présentés lentement (Price et coll. 1996).

L'implication du gyrus angulaire dans le traitement sémantique a été confortée par son activation dans des tâches sémantiques sur des phrases entendues (Humphries et coll. 2007), des objets (Vandenberghe et coll. 1996) et des visages (Gorno-Tempini et Price 2001) et une sur-activation dans des tâches sémantiques vs phonologiques (Démonet et coll. 1992).

Sans trancher sur le rôle exact du gyrus angulaire, une étude de stimulation corticale directe (Roux et coll. 2004) a permis de confirmer son implication dans les processus de lecture. Ces chercheurs ont mis en évidence, parmi 21 régions, que le gyrus angulaire est la quatrième région la plus impliquée en lecture.

Plusieurs auteurs se sont également intéressés au rôle du gyrus frontal inférieur gauche (Pammer et coll. 2004, Hauk et coll. 2006) et ont mis en évidence son implication dans le traitement sémantique. Cette structure joue un rôle plus général d'inhibition des attributs non pertinents du stimulus pour la tâche réalisée (Barde et Thompson-Schill 2002, Gold et Buckner 2002, Thompson-Schill et coll. 1997).

### **Le traitement morphologique**

Concernant le traitement morphologique, plusieurs courants s'affrontent : certaines théories stipulent que la structure morphologique d'un mot complexe affecte sa reconnaissance, indépendamment de sa forme et de son sens. Le traitement d'items linguistiques morphologiquement complexes entraînerait une sur-activation du gyrus frontal inférieur gauche (Tyler et coll. 2004). D'autres auteurs (Devlin et coll. 2003) ont, en revanche, obtenu, dans une étude en IRMf, des superpositions d'activations entre les régions sensibles à la structure morphologique des items et celles sensibles aux effets orthographiques et sémantiques. Ils ont dès lors proposé que la morphologie émerge de la convergence de la forme et du sens d'un mot, et n'est donc pas traitée dans une région cérébrale particulière.

### **Le traitement syntaxique**

La principale structure qui entre en jeu dans le traitement syntaxique est le gyrus frontal inférieur gauche. Pour ce traitement, il faut toutefois distinguer les situations de violations syntaxiques de la complexité syntaxique. En effet, le gyrus temporal supérieur médian et postérieur serait sur-activé lorsqu'il y a violation syntaxique de même que l'operculum frontal et le cortex prémoteur ventral. En revanche, dans des situations de complexité syntaxique, c'est la partie antérieure du gyrus temporal supérieur et l'aire de Broca (BA44) qui seraient impliquées (Dapretto et Bookheimer 1999, Friederici et Kotz 2003). Ainsi, Musso et coll. (2003) ont montré que l'aire de Broca joue un rôle déterminant dans l'acquisition de nouvelles règles grammaticales, uniquement si ces règles sont conformes à la grammaire universelle et indépendamment de la famille linguistique de la langue considérée.

#### **2.4.2.5 Décours temporel du traitement du mot écrit**

Pour comprendre les différentes étapes du traitement lors de la lecture, l'une des méthodes utilisées, la chronométrie mentale, consiste à mesurer les temps de

réaction. Ces temps de réaction ou temps de réponse correspondent à l'intervalle de temps entre la présentation du stimulus et la réponse du sujet. Ils sont censés mesurer, indirectement, les mécanismes mentaux impliqués dans la lecture (Posner 1986). Un autre indicateur précieux pour la compréhension du traitement des mots écrits est le pourcentage de bonnes ou mauvaises réponses.

Six techniques comportementales sont fréquemment utilisées pour l'étude des mécanismes de lecture :

**Les mesures des mouvements oculaires** présentées au chapitre 2.3.4

**Les tâches de décision lexicale** (Rubenstein et coll. 1970). Dans ces tâches, le sujet est amené à décider le plus rapidement possible si une séquence de lettres présentée visuellement correspond ou non à un mot de la langue. Les temps de réaction et le pourcentage de bonnes réponses dépendent de critères de décision appliqués par le lecteur en fonction de la consigne et de la familiarité des stimuli.

**Les tâches de prononciation immédiate ou différée.** Le sujet est amené à prononcer le mot présenté visuellement sur l'écran d'ordinateur. La réponse verbale est enregistrée pour permettre de mesurer plusieurs variables : les latences de réponses, le pourcentage de bonnes réponses et parfois le temps de prononciation. L'inconvénient de cette tâche est qu'elle fait appel à des processus perceptifs et de production et ne permet donc pas de distinguer les traitements perceptifs et les aspects de production et d'articulation. La prononciation différée permet de pallier ce problème puisque le sujet doit attendre l'apparition d'un indice visuel avant de prononcer le mot. Cet indice peut apparaître 500 à 1500 ms après le mot ce qui permet au sujet de préparer le geste articulatoire. Si une différence entre mots de haute et de basse fréquences est constatée en prononciations immédiate et différée, cet effet de fréquence peut être attribué aux processus de prononciation et d'articulation tandis que s'il n'est observé qu'en prononciation immédiate, il sera attribué aux processus de perception et d'identification.

**Les tâches d'identification perceptive.** Un mot visuellement dégradé est présenté brièvement au lecteur. Toute l'information visuelle du mot est donnée mais pendant quelques fractions de secondes ne permettant pas un traitement complet et une identification totale du mot. Plusieurs méthodes permettent de dégrader le mot : le démasquage progressif (présentation en alternance de la cible et d'un masque, le temps de présentation de la cible augmente au fur et à mesure de la séance tandis que celui du masque diminue) et la

présentation fragmentée (seule une partie du mot est présentée et cette partie augmente au fur et à mesure).

**Les tâches de catégorisation sémantique.** Utilisées initialement par Meyer et coll. (1974), elles consistent à demander au sujet si le stimulus présenté visuellement appartient ou non à une catégorie sémantique présentée préalablement. Elles sont souvent utilisées pour étudier le codage sémantique en lecture bien qu'elles ne distinguent pas les processus d'identification des processus de jugement sémantique et que la catégorie sémantique peut jouer le rôle d'amorce et faciliter l'identification de la cible.

**Les techniques d'amorçage.** Elles consistent à présenter un stimulus appelé amorce suivi du mot cible sur lequel le sujet doit effectuer le traitement. L'amorce peut être plus ou moins longue et masquée ou non. En manipulant la nature de l'amorce et du lien qu'elle entretient avec la cible, on peut étudier les différents niveaux de traitement impliqués dans la lecture. La relation entre l'amorce et la cible peut être visuelle (IFR-JEP), orthographique (CHANT-CHAT), phonologique (FOIS-FOIE), morphologique (MURAL-MURET), sémantique (PONEY-CHEVAL) ou syntaxique (UNE-TABLE). La principale question est de savoir si l'amorce facilite ou inhibe le traitement de la cible.

Ces techniques ont permis de nombreuses avancées dans la compréhension des processus de lecture mais l'étude de la chronométrie mentale reste délicate étant donné les nombreux traitements variés et spécialisés opérant en parallèle. En lecture, on sait que le temps de fixation d'un mot, avant qu'il y ait saccade, est de 250 ms en moyenne (Sereno et Rayner 2000). Il a dès lors été déduit que la perception visuelle et la majorité des traitements associés (phonologiques, orthographiques, sémantiques,...) sont réalisés en 200 ms (Posner et coll. 1999, Sereno et Rayner 2000). Or, la conception classique de la temporalité de la reconnaissance des mots est que les 200 premières ms sont destinées aux traitements sensoriels et perceptifs uniquement dans les aires corticales modalité-spécifique qui ne sont sensibles qu'aux caractéristiques physiques du stimulus (luminosité, contraste, complexité spatiale,...) (Proverbio et coll. 2004, Proverbio et Zani 2003). Toutefois, il est maintenant accepté que les processus sémantiques peuvent débuter dès 150 ms et opérer en parallèle d'autres traitements (i.e. orthographiques, phonologiques,...) (Proverbio et Adorni 2008). Des influences « top-down » de haut niveau peuvent donc intervenir très tôt et se coupler aux effets purement sensoriels « bottom-up ».

Les études en potentiels évoqués et en magnétoencéphalographie ont fortement

contribué à la compréhension du dérours temporel des traitements orthographique, phonologique et sémantique des mots ; nous allons donc maintenant exposer les composantes typiques mises en évidence et leurs fonctions associées. Les composantes sensorielles sont au nombre de deux, la P100 et la N170. Leur distribution topographique varie en fonction de la modalité de présentation : elle est temporelle pour la modalité auditive et occipitale en visuel. Parmi les composantes reflétant des traitements de plus hauts niveaux, nous développerons les principales ondes étudiées : la N2 pour les effets lexicaux, la P300 pour les effets attentionnels, la N400 pour les effets sémantiques et la P600 pour les traitements syntaxiques. Etant donnée la nature de nos travaux, nous ne présenterons que les données d'électrophysiologie concernant la reconnaissance visuelle des mots.

**Traitements visuels de « bas niveau » : composante P100 ou P1.** Cette première onde positive semble être le reflet d'une analyse visuelle primaire telle que l'extraction des traits visuels du stimulus (Tarkiainen et coll. 2002). Cet événement n'est pas spécifique à la lecture, il est observé après présentation visuelle d'objets (VanRullen et Thorpe 2001, Martinovic et coll. 2008), de visages (Tarkiainen et coll. 2002, Halit et coll. 2000) et de caractères linguistiques (Tarkiainen et coll. 1999, Proverbio et coll. 2002; 2004). L'onde P1 a une latence d'environ 80 à 100 ms après la stimulation et est localisée, pour les stimuli visuels, au niveau du cortex extra-strié ventro-latéral (Petersen et coll. 1988, Price et coll. 1996). Bien que cet événement soit mis en évidence pour de nombreux types de stimuli visuels, nous notons néanmoins des divergences en fonction de la nature du stimulus. L'onde P1 est, par exemple, moins ample et plus précoce pour des mots que pour des visages ou des voitures (Rossion et coll. 2003). De plus, le facteur attentionnel peut moduler cet événement avec une amplitude plus importante pour des stimuli appartenant à une catégorie prédéfinie que pour des stimuli inattendus. Un effet de typicalité a également été observé avec une P1 plus ample pour des mots ou des pseudomots aux bi- et tri-grammes inconsistants que pour les items consistants (Hauk et coll. 2006).

**Traitement orthographique : composante N170 ou N1.** L'analyse orthographique est le premier traitement visuel spécifique à la reconnaissance d'éléments linguistiques. Elle est révélée par l'onde N170 ou N1 qui prend place 140 à 190 ms après présentation du stimulus dans les régions occipito-temporales (gyri lingual et fusiforme) (Kuriki et coll. 1998, Proverbio et Zani 2003). Selon Salmelin et coll. (2000), l'activation occipito-temporale inférieure gauche

apparaissant 150 ms post-présentation d'un stimulus langagier serait le reflet du premier traitement spécifique aux lettres par rapport à tout autre symbole. D'autres auteurs ont observé une onde négative occipito-temporale contralatérale à la stimulation visuelle, 150 à 160 ms après l'apparition d'un mot ou d'un non-mot (Cohen et coll. 2000). Ils interprètent cet événement comme une activation de l'aire visuelle V<sub>4</sub>, connue pour contribuer à la vision des formes et des couleurs. D'autres encore (Fiebach et coll. 2002) ont montré une activation des aires occipito-temporales bilatérales ainsi que du gyrus temporal supérieur médian gauche 170 à 230 ms post-stimulation pour des séquences de lettres, mots ou nonmots. Cette négativité bilatérale entre 150 et 200 ms post-stimulation a été interprétée comme un traitement pré-lexical permettant de distinguer entre mots et séquences de lettres non porteuses de sens (Cornelissen et coll. 2003, Martin et coll. 2006, Proverbio et coll. 2002). Finalement, comme pour l'onde P<sub>1</sub>, la composante N<sub>170</sub> est plus ample lors de la présentation de stimuli « attendus », reflétant un effet attentionnel (Kutas 1997). Dans la lignée de leurs travaux, Sereno et collaborateurs vont plus loin et proposent une autre interprétation de l'onde N<sub>1</sub> suite à l'observation d'une modulation de celle-ci par la fréquence lexicale des mots (Sereno et coll. 1998; 2003). Cette activation reflèterait l'accès lexical au cours de la lecture de mots isolés, plutôt qu'un traitement pré-lexical.

**Traitement lexical : composante N<sub>2</sub>.** Cette onde négative apparaît 180 à 200 ms post-stimulation dans les régions occipito-temporales gauches correspondant selon Cohen et coll. (2000) au « Visual Word Form System (Système de la forme visuelle des mots) ». Cette activation représenterait la transition entre les effets purement visuels et les effets lexicaux induits par la présentation d'un mot. En effet, cette composante est prolongée pour les mots par rapport aux non-mots. Elle semble spécifique à la reconnaissance des mots et des pseudomots, mais pas des non-mots et de séquences de caractères non alphabétiques (Cohen et coll. 2000; 2002, Petersen et coll. 1990). Elle est également plus ample pour les lettres que pour les chiffres (Polk et coll. 2002). Toutefois, la question de la spécificité de cette activation au traitement des mots n'est pas encore tranchée. Par ailleurs, cette activation de la « Visual Word Form Area » serait accompagnée d'une activation dans le gyrus frontal inférieur (BA 44/6), le gyrus temporal antérieur médian (BA 21/38) et le gyrus temporal postérieur médian (BA 37/39) (Pammer et coll. 2004). La temporalité du traitement lexical en lecture n'est pas clairement définie étant donnés les ré-

sultats très divergents des études sur les effets de fréquence lexicale. Certains auteurs ont constaté des différences d'activation précoce (dès 150 ms) entre mots et non-mots (Proverbio et coll. 2004, Sereno et coll. 1998) tandis que d'autres n'observent ces différences que 500 ms après la stimulation (Polich et Donchin 1988). Cependant, de nombreuses expériences répertorient des activations latéralisées à gauche spécifiques à la présentation des mots entre 180 et 250 ms après la stimulation (Pammer et coll. 2004, Proverbio et coll. 2002, Salmelin et coll. 1996, Tarkiainen et coll. 1999). De plus, une distinction a été mise en évidence entre les mots et les pseudomots avec une onde N2 plus ample pour les premiers pouvant refléter un début d'accès au lexique sémantique (Proverbio et Adorni 2008). Finalement, des activations dans les aires frontales inférieures gauches entre 170 et 230 ms post-stimulation sont mises en évidence en présentation visuelle de séquences de lettres n'étant pas des mots (Fiebach et coll. 2002, Rodriguez-Fornells et coll. 2002). Ces activations pourraient représenter les traitements opérés sur les séquences alphabétiques ne pouvant être traitées par la voie directe. Ces régions appartiendraient à la voie phonologique de lecture et assureraient entre autres l'assemblage phonologique des pseudomots.

**Traitement phonologique : les composantes P150 et N450.** La MisMatch Negativity est une composante caractérisée par une déflexion négative fronto-centrale apparaissant 100 à 300 ms après discrimination d'un changement au niveau des stimulations auditives (voir (Näätänen et coll. 2007) pour une revue). Une activation temporelle 100 ms post-stimulation a, quant à elle, été attribuée aux processus de mémoire à court terme par Proverbio et Zani (2003). Ces mêmes auteurs ont proposé que les activations antérieures gauches survenant 160 à 215 ms post-stimulation révéleraient la mise en place de processus phonologiques. Dans une tâche de décision lexicale utilisant des pseudo-homophones, un effet de facilitation phonologique a été observé dès 150 ms dans des régions temporo-pariétales gauches (Braun et coll. 2009). Une modulation de la N250 est également constatée lors d'un amorçage orthographique ou phonologique. Elle est considérée comme le marqueur d'un traitement sous-lexical (Grainger et coll. 2006, Holcomb et Grainger 2006). Des tâches de rimes sur des stimuli visuels ont également permis d'étudier les traitements phonologiques en lecture. Elles ont permis de mettre en évidence une négativité plus importante autour de 450 ms lorsque l'amorce ne rime pas avec la cible que lorsqu'elle rime (Grossi et coll. 2001, Khateb et coll. 2007).

Un effet similaire a été observé avec des pseudomots (Coch et coll. 2008). Dans leur étude comparant des mots, des pseudomots et des non-mots, Bentin et coll. (1999) ont constaté une plus grande négativité 320 ms après la cible pour les items qui ne riment pas. La différence entre les traitements phonologiques précoces (P150) et tardifs (N450) pourrait tenir du caractère respectivement implicite ou explicite des traitements phonologiques impliqués dans ces tâches.

**Effets attentionnels : composante P300.** L'événement P300 survient à l'apparition d'un ou plusieurs stimuli peu fréquents dans une séquence d'items identiques, quelque soit la modalité de présentation. Son amplitude est connue pour refléter la quantité de ressources attentionnelles allouée à une stimulation (Wickens et coll. 1983, Kramer et Strayer 1988), alors que sa latence reflèterait le temps requis pour la catégorisation d'un stimulus (Kutas et coll. 1977, McCarthy et Donchin 1981, Polich 1986). Cette onde peut être décomposée en 2 composantes : la P3a qui est maximale au niveau des aires fronto-centrales et semble être un marqueur de l'évaluation du signal et des variations automatiques d'attention (Comerchero et Polich 1998, Escera et coll. 1998, Katayama et Polich 1998) ; et la P3b, maximale dans les régions pariétales, associée aux opérations de mémoire de travail (Donchin et coll. 1986, Polich et Kok 1995, Fosker et Thierry 2005). Cependant, l'événement P300 est mis en évidence dans des tâches n'impliquant pas d'effet attentionnel particulier ou de stimulus déviant. En reconnaissance visuelle, la P300 est plus ample pour des stimuli visuels communs quelque soit le type d'items : mots, images ou visages (Rudell et Hua 1997). En reconnaissance de mots écrits par exemple, une P300 est observée lorsque les sujets voient des mots, mais pas lorsqu'ils voient des pseudohomophones ou des mots écrits en casses alternées (« mixed case words » : eg. tAbLe) (Sauseng et coll. 2004). D'autre part, une déviance négative du tracé de Potentiels Evoqués est observée dans une tâche nécessitant un maintien d'attention sur un item particulier en attendant par exemple la présentation d'un autre item. Cette dérive reflète l'implication du cortex pré-frontal inférieur dans les mécanismes attentionnels (Näätänen et coll. 1992, Thierry et coll. 1998; 2003a;b).

**Traitement sémantique : composante N400.** Cette composante négative particulière (N400) a été mise en évidence au niveau des ERP consécutifs à la présentation d'un mot sémantiquement incongru par rapport au contexte d'une phrase. Elle a été interprétée comme spécifiquement liée au traitement sé-



mantique des informations linguistiques incongrues (Kutas et Hillyard 1980). Elle est induite par une anomalie sémantique dans un stimulus langagier en modalité visuelle (Kutas et Hillyard 1980, Besson et Macar 1986) ou auditive (Besson et Macar 1986, Friederici et coll. 1993). On parle classiquement d'« effet N400 ». Cet événement est considéré comme reflétant les traitements impliqués dans l'intégration sémantique (Friederici 2004, Kutas 1997). Il est localisé dans les régions centro-pariétales. D'autres zones semblent impliquées dans la convergence des informations orthographique, phonologique et sémantique du mot présenté visuellement. Ces aires associatives inter-modales sont le gyrus temporal postérieur médian gauche (BA 37/39), les gyri supramarginal et angulaire ainsi que l'operculum temporal supérieur. Leur activation débute dès 200 ms post-stimulation mais atteint son pic entre 300 et 550 ms. De nombreuses autres composantes « sémantiques » sont retrouvées dans d'autres temporalités et topographies. Certains auteurs observent une activation frontale inférieure gauche environ 220 ms après stimulation (Abdullaev et Bechtereva 1993, Abdullaev et Posner 1998, Raichle et coll. 1994). Les traitements sémantiques pourraient également impliquer une activation temporo-pariétale gauche, 600 ms après stimulation, et une activation cingulaire antérieure 170 ms après stimulation (Abdullaev et Posner 1998).

**Traitement syntaxique : composantes LAN et P600.** La LAN (Left anterior negativity) est une onde négative observée sur les électrodes antérieures gauches environ 180 ms après présentation auditive d'une aberration syntaxique, et suivie d'une négativité vers 400 ms (Friederici et coll. 1993). Elle semble refléter un traitement syntaxique précoce et automatique (Friederici 2004). Un traitement plus tardif et contrôlé est révélé par une onde positive intervenant vers 600 ms après la stimulation (P600) dans un contexte de violation syntaxique (Friederici 2004). Cet événement survient dans les régions postérieures et s'accompagne d'une négativité frontale bilatérale 300 à 500 ms après stimulation visuelle (Hagoort et coll. 2003). L'effet P600 a été observé dans des tâches impliquant des anomalies sémantiques et que le cerveau réanalyse le stimulus d'entrée pour vérifier qu'il n'y ait pas eu erreur de traitement de l'information. Il s'agit de l'hypothèse du « P600 monitoring » : un système de contrôle du traitement de la perception du langage, comme cela a déjà été mis en évidence en production de langage (Levelt 1983) et en activation motrice (Holroyd et Coles 2002). Ceci permettrait à un lecteur, lorsqu'il

perçoit un message linguistique incongru de vérifier qu'il ne s'agit pas d'une erreur de traitement.

### **2.4.3 Conclusion**

Dans cette partie, nous avons présenté les connaissances actuelles sur les mécanismes de lecture. Nous avons évoqué les différents modèles proposés pour expliquer le traitement du langage écrit. Les régions impliquées dans cette activité de lecture et le décours temporel ont été décrits. Toutefois, ce traitement des séquences alphabétiques n'est pas une compétence innée et ne s'acquiert pas implicitement. Chez le lecteur expert, la lecture semble une activité naturelle et automatique mais cela nécessite une instruction explicite. Pour certains enfants, sans difficulté par ailleurs, l'apprentissage de la lecture est particulièrement difficile et l'automatisation ne se met pas en place. Le chapitre suivant sera consacré à l'apprentissage de la lecture et au trouble spécifique du langage écrit : la dyslexie.

# LA LECTURE : DÉVELOPPEMENT NORMAL ET PATHOLOGIQUE

# 3

Un jour, il se fit un déclic dans ma tête. Maman avait ouvert sur la table de la salle à manger la méthode Regimbeau : je contemplais l'image d'une vache et les deux lettres, c, h, qui se prononçaient ch. J'ai compris soudain qu'elles ne possédaient pas un nom à la manière des objets mais qu'elles représentaient un son : j'ai compris ce que c'est qu'un signe. J'eus vite fait d'apprendre à lire.

Simone de Beauvoir,  
Mémoires d'une jeune fille rangée.

### 3.1 L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ÉCRIT

D'après les partisans d'une conception romantique de la lecture, il suffirait d'être mis en présence de mots écrits et de leur signification pour apprendre à lire. Les scientifiques s'accordent aujourd'hui sur le fait que cela ne suffit pas. Entre l'entrée au CP et la fin du CE2, l'enfant va passer d'une connaissance limitée des lettres à la lecture de milliers de mots. Cette étonnante évolution ne peut être possible que par la mise en place d'un système cognitif complexe dont le fondement est la mise en relation d'informations visuelles avec leurs correspondances sonore et sémantique. L'acquisition de ces mécanismes complexes de lecture, devenus inconscients chez le lecteur expert, nécessite plusieurs années. Dans cette section, nous nous attacherons à détailler les étapes de cet apprentissage en présentant le modèle le plus connu, celui de la psychologue anglaise Uta Frith (1985). Nous évoquerons ensuite le rôle crucial de la conscience phonologique considérée aujourd'hui par la plupart des auteurs comme un prérequis à la lecture.

#### 3.1.1 Les étapes d'acquisition du langage écrit

Le modèle de la lecture qui a exercé la plus grande influence en recherche sur l'acquisition de la lecture est celui proposé par Frith (1985). Elle proposa que la lecture passe par trois phases successives, caractérisée chacune par une stratégie particulière.

##### 3.1.1.1 Le stade logographique

L'enfant utiliserait tout d'abord, dès l'âge de 3 ans, une stratégie logographique consistant à reconnaître les mots à travers leurs traits physiques les plus saillants et leur contexte. On peut distinguer deux phases au sein de cette étape de pré-lecture, la première où l'identification se fait surtout par le contexte et la seconde où elle s'appuie plutôt sur la forme du mot.

**L'identification contextuelle.** L'enfant va s'appuyer sur des éléments du contexte d'apparition tels que la couleur ou le logo dans le cadre d'une publicité par exemple. Ainsi, il peut reconnaître la présentation habituelle de « Coca-Cola » mais ne peut identifier ce même mot s'il est proposé dans un contexte différent. De plus, il peut reconnaître erronément « Cora-Coxa » comme étant le

nom de la célèbre marque si la couleur et l'environnement global sont préservés. Le fait que l'enfant ne perçoive pas la différence malgré une violation de forme montre qu'il ne s'appuie pas encore sur des traits visuels spécifiques au mot.

**L'identification centrée sur les traits visuels du mot.** Le pré-lecteur va mémoriser certains traits graphiques saillants du mot lui permettant de le différencier d'autres mots. Les indices utilisés sont la longueur du mot, la forme des lettres (montantes ou descendantes), le redoublement d'une lettre ou une lettre connue. A ce stade, le nombre de mots pouvant être identifiés est bien entendu restreint et l'enfant commet de nombreuses erreurs de type paralexies (mot visuellement ou sémantiquement proche). L'identification n'est plus strictement idéographique mais dépend de la reconnaissance de traits correspondants à des indices visuels mémorisés. L'approche du mot se fait par une analyse visuelle partielle du mot ; la médiation phonologique n'intervient nullement et l'enfant n'a pas recourt à un « déchiffrage » lettre à lettre. Selon Seymour et Elder (1986), cette stratégie logographique ne disparaît pas avec l'installation des procédures phonologiques. Ces auteurs ont étudié la lecture de prénoms chez de jeunes enfants et ont montré qu'elle pouvait se faire rapidement et sans trace de sub-vocalisation (mouvement des lèvres préalable au déchiffrage). Ce phénomène persiste même lorsque l'enfant traite phonologiquement d'autres items. La rapidité à laquelle il identifie les prénoms et le fait que les temps de latence et de lecture ne dépendent pas de leur longueur prouve que la stratégie logographique peut persister au stade suivant. Néanmoins, le rôle de cette identification centrée sur les traits visuels dans l'apprentissage de la lecture ne semble pas primordial. Certains enfants ne passeraient pas par cette étape et le niveau de « lecture » logographique ne semble en rien prédictif du niveau de lecture ultérieur (Masonheimer et coll. 1984). Stuart et Coltheart (1988) ont émis l'hypothèse que l'utilisation de cette stratégie logographique pourrait dépendre des compétences métaphonologiques (capacités à segmenter les mots de la parole en phonèmes). Ils ont mis en évidence que des enfants de 4 ans et demi avec un certain niveau de compétences métaphonologiques peuvent utiliser les lettres initiales et finales d'un mot comme indice phonologique dès les premiers contacts avec le langage écrit. En analysant le type d'erreurs, ils ont constaté que les enfants peuvent rapidement utiliser les données phonologiques si leur capacité à analyser les sons le permettent. Ces résultats soulèvent la question

de la transition entre le stade logographique où le mot est traité de façon globale et le stade alphabétique où le traitement est séquentiel. Dans son propre modèle d'apprentissage de la lecture, Ehri (Ehri 1998; 1999; 2002) distingue une étape pré-alphabétique (qui correspondrait aux deux phases du stade logographique) d'une étape partiellement alphabétique (« Partial alphabetic phase »). Selon elle, cette étape intermédiaire intervient au moment où l'enfant apprend et connaît le nom des lettres et s'en sert pour identifier des mots. Plusieurs études ont montré que des enfants avaient plus de facilités pour apprendre à faire correspondre de fausses formes orthographiques à des mots donnés (eg. 'GRF' pour le mot « giraffe » en anglais) quand la lecture du nom des lettres le composant pouvait aider à la récupération du mot.

### 3.1.1.2 Le stade alphabétique

La stratégie alphabétique est basée sur la décomposition des mots en graphèmes, l'association des graphèmes à des phonèmes et la synthèse de ces phonèmes. Le traitement est strictement séquentiel, du début vers la fin du mot. A cette phase du développement, l'enfant met donc en place la voie de lecture indirecte ou par assemblage présentée dans le chapitre précédent (2.4.1). Cette étape repose pour l'essentiel sur la prise de conscience de l'existence d'unités sub-lexicales au niveau des mots écrits et parlés. Quand l'identification des lettres fait l'objet d'un apprentissage systématique et explicite, cette prise de conscience au niveau de l'écrit ne pose généralement pas de problème à l'apprenti lecteur. L'enfant s'apercevra qu'une même séquence de lettres peut se retrouver dans différents mots et se prononcer de la même façon. Cet apprentissage est en grande partie basée sur la conscientisation de la structure segmentale de la parole et le développement de la conscience phonémique (l'enfant découvre que les mots sont constitués de phonèmes). Le rôle de la conscience phonologique à cette étape de la lecture sera discuté dans la partie 3.1.2. Après avoir réalisé que les mots écrits et les mots parlés sont formés de graphèmes et de phonèmes respectivement, le lecteur débutant va devoir apprendre à mettre ces unités en correspondances. Il va se rendre compte qu'il y a une similarité phonologique matérialisée par la similitude des lettres initiales étudiées. Dans le même temps, il va découvrir les similitudes articulatoires de ces productions voisines. C'est cette redondance entre indices visuels, auditifs et articulatoires qui va conduire l'enfant à prendre conscience de l'existence d'une relation systématique entre unités écrites et parlées. La question de savoir

si cette connaissance des relations entre unités sub-lexicales écrites et parlées reste implicite ou si elle se cristallise sous forme de règles explicites reste discutée. Toutefois, l'utilisation de ces règles de correspondances grapho-phonémiques semble de courte durée avec l'utilisation d'unités sublexicales de taille supérieure dès la fin de la première année d'apprentissage de la lecture (Valdois 1998).

### 3.1.1.3 Le stade orthographique

Cette troisième stratégie permet la reconnaissance instantanée des parties significatives du mot, en prenant en considération l'ordre des lettres mais pas leurs sons (Morais 1994). Selon Frith (1985), l'unité caractéristique à cette étape serait le morphème mais d'autres auteurs ont postulé l'existence d'unités intra-syllabiques : l'attaque et la rime (voir (Ziegler et Goswami 2005) pour une revue). Cette phase du développement correspond à la mise en place de la procédure d'adressage. Le lecteur va utiliser ses connaissances lexicales pour identifier les mots écrits que ceux-ci fassent partie ou non de son lexique orthographique. Ce dernier est constitué de représentations orthographiques de plus en plus complètes et précises de par l'utilisation des correspondances grapho-phonémiques. Les représentations lexicales des mots familiers deviennent alors directement disponibles et l'enfant retrouve par adressage la forme phonologique. L'accès à la sémantique est également facilité et plus rapide et ne nécessite plus le passage par la forme phonologique. Cette étape se caractérise par l'accès à la lecture courante, lecture silencieuse plus fluente et plus rapide car reposant sur un accès lexical direct. L'identification des mots s'automatise et ne nécessite plus autant de ressources attentionnelles. Ce stade peut donc être séparé en deux phases : une première où le lecteur réalise un traitement analogique et la seconde correspondant à l'automatisation des processus de lecture. Le traitement analogique renvoie au fait que l'enfant utilise ses connaissances lexicales pour déchiffrer les mots nouveaux. Dans un deuxième temps, la lecture devient automatique : la forme phonologique et le sens du mot seraient mobilisés sans avoir à recourir à un code ou à des règles. L'unité de traitement devient le mot (en tant que lexème). Le passage à une lecture automatisée requiert de faire basculer l'attention des processus de décodage vers la compréhension. Quand l'identification du mot est directe, l'attention du lecteur peut alors être entièrement portée sur la compréhension des mots, textes, etc (LaBerge et Samuels 1974). Le modèle d'apprentissage d'Uta Frith est encore considéré comme référence pour la compréhension de la lecture mais il a été critiqué et complété. Le principal ques-

tionnement concerne le caractère successif des différentes étapes. En effet, dans la première version de son modèle, Frith considérait qu'un stade ne pouvait débiter que lorsque le précédent était achevé. Cela ne reflète pas la réalité quand l'on observe la façon dont les apprentis lecteurs procèdent les premières années (voir (Sprenger-Charolles et coll. 2006)).

### **3.1.2 Le rôle de la conscience phonologique dans l'acquisition du langage écrit**

Comme nous l'avons évoqué, la conscience phonémique joue un rôle primordial pour la mise en place de la stratégie alphabétique, elle-même nécessaire à l'élaboration du lexique. Il semble donc relativement évident que cette habileté puisse avoir une influence sur les capacités de lecture mais nous tenterons de comprendre quelles sont les relations entre ces compétences phonémiques et la lecture. Avant cela, il nous semble primordial de distinguer consciences phonémique et phonologique. Morais (1991) propose que la conscience phonologique est un terme plus global relatif au fait de reconnaître l'existence d'unités inférieures au mot que ces unités soient au non les phonèmes. Elle inclut donc la conscience phonémique qui est plus spécifique et concerne la compréhension que les mots de la langue sont constitués de phonèmes. Cette distinction est importante car nous savons par exemple que la conscience phonémique est corrélée à la lecture ce qui n'est pas le cas de la prise de conscience des unités syllabiques. Le développement de la conscience phonémique se manifeste par l'acquisition d'habiletés métaphonologiques c'est-à-dire la capacité à « manipuler » volontairement les unités phonémiques. Plusieurs tâches permettent d'étudier cette habileté : l'omission du premier son d'un mot ou un pseudomot (« crin » → « rin »), le remplacement d'un phonème par un autre (« plon » → « plou »), le dénombrement de phonèmes (« blufipin » : 7 phonèmes), etc. Dès l'âge de 4 ans, les enfants sont capable de distinguer 2 mots ne différant que d'un phonème (« cadeau », « radeau ») sans pour autant pouvoir expliquer ce qui diffère formellement. Ils commencent également à pouvoir compter le nombre de syllabes qui composent un mot sans pouvoir dire combien de phonèmes sont présents dans ce même mot. Ce n'est que vers l'âge de 6 ans que des changements opèrent et que certaines aptitudes phonémiques sont constatées. De plus, Morais (1994) signale que les adultes illetrés n'ont pas conscience des phonèmes. Ces résultats suggèreraient que l'acquisition de la lec-



ture est un déterminant majeur de l'immersion de la conscience phonémique, indépendamment des facteurs de maturation intellectuelle. Toutefois, d'autres études témoignent plutôt du fait que la conscience phonémique favorise l'apprentissage de la lecture. Ainsi, le niveau de compétences métaphonologiques chez les prélecteurs est un bon prédicteur des capacités d'apprentissage de la lecture. Wimmer et coll. (1991) démontrent que tous les jeunes enfants qui possèdent une bonne conscience phonémique apprennent rapidement à lire. Mais c'est vrai aussi pour ceux qui possédaient de moins bonnes compétences métaphonologiques. Ces dernières ne semblent donc pas être un prérequis absolu au développement de la lecture. La prise de conscience explicite des unités phonémiques qui composent les mots semble même dépendre pour beaucoup d'enfants de l'apprentissage de la lecture. Castles et coll. (2003) ont proposé que la lecture ne permet pas un développement de la conscience phonémique du jeune lecteur mais qu'elle l'aide à aborder différemment les tâches métaphonologiques en utilisant ses ressources orthographiques. Pour conclure, nous pouvons dire que, tout comme pour le langage oral pour lequel il existe des prédispositions qui nécessitent un bain langagier précoce pour se développer, la conscience phonologique nécessite pour se mettre en place, en plus de son développement normal, une confrontation à un système alphabétique.

Bien que ce soit une activité cognitive complexe et que son acquisition demande un enseignement explicite, la plupart des enfants n'ont pas de difficultés à entrer dans cet apprentissage. Néanmoins, certains n'y parviennent pas ou très difficilement et la lecture reste une épreuve pour eux durant de nombreuses années. La partie suivante sera consacrée à ces difficultés d'apprentissage de la lecture : la dyslexie.

## 3.2 LA DYSLEXIE DE DÉVELOPPEMENT.

Le terme de dyslexie de développement est encore trop souvent utilisé à mauvais escient pour évoquer l'ensemble des difficultés de lecture. Dans les consultations de troubles des apprentissages, nous rencontrons encore bon nombre de mauvais lecteurs arriver en nous signalant à tort qu'ils sont « dyslexiques ». Au vu de cet abus de langage, il nous semble primordial de débiter cette section en définissant ce qu'est la dyslexie. Nous verrons ensuite qu'il existe plusieurs types de dyslexies et nous présenterons les différents troubles associés. Nous poursuivrons

en expliquant les différentes hypothèses concernant les causes de la dyslexie. Finalement, nous nous attarderons sur le fonctionnement cérébral des dyslexiques.

### 3.2.1 Définition

Pour pouvoir parler de dyslexie, l'Observatoire National de la lecture (Observatoire national de la lecture 1998) signale que deux critères doivent être pris en compte. Il faut, d'une part, que la capacité d'identification des mots écrits, qui est l'habileté spécifique à la lecture, présente une anomalie et d'autre part que cette dernière trouve son origine dans les structures cérébrales et cognitives qui sous-tendent cette capacité. Ceci permet donc d'exclure du diagnostic de dyslexie tous les mauvais lecteurs dont les difficultés d'identification des mots écrits sont liées par exemple à de la surdité, des troubles affectifs ou un manque de stimulation linguistique.

En 1968, la Fédération mondiale de neurologie a défini la dyslexie comme étant un trouble de l'apprentissage de la lecture survenant en dépit d'une intelligence normale, de l'absence de troubles sensoriels ou neurologiques, d'une instruction scolaire adéquate, d'opportunités socioculturelles suffisantes ; en outre, elle dépend d'une perturbation d'aptitudes cognitives fondamentales souvent d'origine constitutionnelle (Morais 1994). Cette définition est intéressante par son caractère « d'exclusion » mais pêche par son manque de critère diagnostic quant au trouble de l'apprentissage de la lecture. La définition fournie par la classification de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) répond en partie à cette critique. Voici les critères permettant, selon l'OMS, de poser le diagnostic de dyslexie :

A L'un des deux points suivants doit être présent

- (1) un score de capacités de lecture et/ou de compréhension se situant au moins 2 erreurs-standard en dessous du niveau attendu sur la base de l'âge chronologique et l'intelligence générale de l'enfant, les aptitudes de lecture de même que le QI étant évalués sur un test administré individuellement et standardisé par rapport au niveau culturel et au système éducatif de l'enfant.
- (2) un antécédent de difficultés sévères de lecture, ou des scores aux tests satisfaisants au critère A(1) à un plus jeune âge, plus un score à un test d'orthographe se situant au moins deux erreurs-standard en dessous du niveau attendu sur la base de l'âge chronologique et du QI de l'enfant.

- B Le trouble décrit au critère A interfère de façon significative avec la réussite scolaire ou les activités de la vie quotidienne nécessitant des aptitudes de lecture.
- C Le trouble n'est pas la conséquence directe d'un déficit d'acuité visuelle ou auditive, ou d'une affection neurologique.
- D Les expériences scolaires sont dans la moyenne de ce que l'on peut attendre (c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu d'inadéquation majeure dans la scolarisation).
- E *Critères d'exclusion très habituellement utilisés.* QI inférieur à 70 sur un test standardisé administré individuellement.

Le principal critère repose donc sur des tests de lecture préalablement validés auxquels l'enfant doit réaliser des performances inférieures à deux écart-types de la moyenne de la population de même âge et même intelligence. Dans d'autres définitions, ce critère est remplacé par « un âge de lecture inférieur d'au moins 18 mois à l'âge réel » ce qui, en pratique revient à peu près au même. Remarquons par ailleurs, qu'il n'est pas fait référence à d'éventuels troubles psychiatriques comme critère d'exclusion. Cela signifie qu'en théorie, le terme de dyslexie s'appliquerait également à des enfants présentant des difficultés de lecture dans le cadre d'une pathologie affective sérieuse. Certains chercheurs préfèrent éliminer de la définition tous les cas de « troubles psychologiques ou psychiatriques avérés » (Seymour 1990).

Ces définitions restent toutefois assez imprécises et rendent donc particulièrement difficiles les études épidémiologiques. Toutefois, dans son expertise collective, l'INSERM rapporte que la dyslexie toucherait 6 à 8 % d'enfants en France. On note par ailleurs que ce trouble touche plus de garçons que de filles, le ratio pouvant aller de 3 pour 2 à 5 pour 4 dépendant des études. De plus, la fréquence de ce trouble dans la population varie en fonction de la langue, étant plus importante pour les langues dites « opaques », tel que l'anglais, que pour les langues plus « transparentes », tel que l'italien (Lindgren et coll. 1985).

### 3.2.2 Les sous-types de dyslexie

La question de l'existence de plusieurs types de dyslexies se pose depuis plus de quarante ans et de nombreuses oppositions ont été décrites : « dyslexie génétique » vs. « dyslexie avec fonctionnement cérébral minime » (Bannatyne et Money 1966), « dyslexie auditive » vs. « dyslexie visuelle » (DE QUIROS 1964, Myklebust 1968), « faiblesse en lecture globale de mots » vs. « troubles du décodage » (Mitterer

1982),... Il n'existe pas encore aujourd'hui de classification officiellement reconnue par l'ensemble des auteurs mais nous présenterons la plus communément utilisée. Elle se base sur le déficit de lecture et répartit les dyslexies en 3 grandes catégories : les dyslexies phonologiques, les dyslexies orthographiques ou de surface et les dyslexies mixtes.

**Les dyslexies phonologiques.** Elles se caractérisent par un trouble sélectif en lecture de pseudomots et la production d'erreurs phonémiques. Il s'agit d'une atteinte de la voie d'assemblage et les mots sont donc lus préférentiellement de façon globale. Un déficit orthographique de même type est observé avec de faibles performances en dictée de pseudomots. Les enfants souffrant de cette forme de dyslexie présentent des difficultés associées sur les capacités métaphonologiques et un déficit de mémoire verbale à court terme. Lussier et Flessas (2001) répertorient ainsi les symptômes suivants comme étant fréquemment observés dans ce type de dyslexie :

- Une atteinte de la conscience phonologique ;
- Une absence de l'automatisation du décodage grapho-phonologique ;
- Un déficit de la mémoire de travail et une atteinte de la mémoire auditivo-séquentielle ;
- Une lenteur d'accès à l'image motrice des mots en évocation rapide ;
- Une tendance à faire des erreurs dérivationnelles et à utiliser au maximum le contexte et la voie sémantique.

La dyslexie phonologique représente, d'après des chiffres cités par l'Observatoire National de la lecture (Observatoire national de la lecture 1998), 67% des dyslexiques francophones.

Cette sorte de dyslexie est parfois appelée phonétique, linguistique ou dysphonétique.

**Les dyslexies de surface.** Ici, c'est la voie d'adressage qui serait principalement atteinte. Les difficultés concernent donc surtout la lecture de mots irréguliers avec de nombreuses erreurs de régularisation, et la vitesse de lecture. La dysorthographie est massive : les mots sont écrits tels qu'ils se prononcent sans prise en compte de leurs caractéristiques orthographiques. En fait, ces enfants ne semblent disposer d'aucune information mémorisée sur la séquence orthographique des mots. Pour expliquer ce type de cas, Sylviane Valdois (Valdois et coll. 2004, Bosse et coll. 2007) suggère l'existence d'un trouble spécifique au matériel orthographique de nature visuo-attentionnelle.

La symptomatologie décrite par Lussier et Flessas (2001) est la suivante :

- Une atteinte de la reconnaissance visuelle des mots en mémoire logographique ;
- Une stratégie d'assemblage dominante par correspondance graphème-phonème entravant la lecture de mots irréguliers ;
- Un déficit de la mémoire de travail ne permettant pas l'extension d'un lexique visuel d'entrée ;
- Des confusions persistantes dans l'orientation spatiale des lettres et/ou des chiffres au niveau de la lecture et de l'écriture ;
- Une incapacité d'accès au sens en raison de la lenteur anormale de décodage et une tendance à faire des erreurs de régularisation et de segmentation.

Cette forme concerne 10% des dyslexies (Observatoire National de la lecture, 1998). Elle est parfois appelée dyslexie dyséidétique, morphémique, d'analyse visuelle, lexicale ou encore de surface.

**Les dyslexies mixtes.** Dans les cas de dyslexies mixtes, les deux procédures de lecture sont atteintes. Le déficit à la fois phonologique et visuel compromet fortement la voie d'assemblage qui sera pourtant préférentiellement choisie. Les difficultés concernent tous les types d'items en lecture et en orthographe. Lussier et Flessas (2001) rapportent que, en rapport avec son nom, les symptômes observés sont un mélange de ceux exposés pour les deux autres sortes de dyslexies. Cette forme concerne plus ou moins 23% des dyslexies (Observatoire national de la lecture 1998).

Une autre classification non plus basée sur les modèles de lecture adulte a été proposée par Morris et coll. (1998). Ces auteurs ont voulu prendre en compte tous les domaines dans lesquels les enfants dyslexiques pouvaient avoir des difficultés : le langage, la mémoire de travail et les compétences cognitives générales. Ils ont fait passer une batterie complète de tests métaphonologiques, de langage, de mémoire et d'autres capacités cognitives à 232 enfants. Ils ont ensuite, grâce à des analyses statistiques, défini 7 sous-groupes de dyslexiques. Parmi ces groupes, deux avaient des difficultés en langage écrit mais également en langage oral. Chez les enfants ayant un trouble spécifique du langage écrit, ceux de quatre groupes sur les cinq présentaient une conscience phonologique déficiente (les différences entre ces groupes concernaient les compétences en dénomination rapide et en mémoire à court terme verbale). Le dernier groupe présentait un déficit en temps de traitement verbal et non verbal (en particulier en lecture).

Le fait qu'aucune classification ne fasse l'unanimité est lié à la difficulté d'établir

des catégories précises en matière de dyslexie. Dans les études faites sur le sujet, de nombreuses variables peuvent faire changer les proportions des différents types de dyslexie. Sprenger-Charolles et Serniclaes (2003) ont en effet observé que les résultats ne sont pas les mêmes selon l'âge des enfants recrutés, selon leur langue maternelle ou encore selon les variables dépendantes du protocole (temps de latence en lecture, nombre de bonnes réponses, types d'erreurs...). Tous ces efforts de catégorisation des dyslexies sont liés à la grande hétérogénéité observée dans cette pathologie. Il n'est pas rare d'entendre dire qu'il y a autant de types de dyslexies que d'enfants dyslexiques. Cette diversité est due en partie aux difficultés de lecture qui diffèrent et aux stratégies mises en place par les enfants pour y pallier mais également à des troubles associés. En effet, les profils de dyslexies sont souvent complétés par des difficultés associées. Ces dernières feront l'objet de la partie suivante.

### 3.2.3 Les troubles associés.

Dans la classification internationale des maladies, CIM-10, le trouble spécifique de la lecture est repris dans la section des troubles spécifiques des acquisitions scolaires. Ce que nous allons voir ici, c'est qu'au sein de ces troubles, les enfants présentent rarement une difficulté isolée et ont plus généralement une constellation de symptômes. En 2003, (Habib 2003) publie une étude épidémiologique portant sur 177 enfants avec un diagnostic principal de dyslexie de développement, 90% d'entre eux ont des troubles associés. Voici les troubles fréquemment observés chez les enfants dyslexiques :

**La dysorthographe.** Il est peut-être abusif de parler de comorbidités entre dyslexie et dysorthographe étant donné les liens étroits entre lecture et orthographe. Nous devons toutefois signaler que presque tous les dyslexiques ont également des difficultés en orthographe. La dysorthographe est un trouble de l'apprentissage de l'orthographe qui peut affecter divers aspects : l'orthographe d'usage qui est la forme spécifique de chaque mot (ex. : « corbeau » et non « corbaud »), l'orthographe phonétique qui reflète la capacité à utiliser efficacement les règles de conversions phonème-graphème, l'orthographe grammaticale, c'est-à-dire la transcription des morphèmes flexionnels (ex. : le pluriel des noms ou le temps des verbes).

**Les troubles spécifiques du langage oral.** Ici encore, le sujet semble porter à

controverse. En effet, d'une part, on retrouve une catégorie d'auteurs pour qui les deux systèmes de langage sont si étroitement liés que la présence de troubles de langage oral devrait être un facteur d'exclusion au même titre que la déficience intellectuelle. D'après ces auteurs, la lecture étant fortement calquée sur le langage oral, la perturbation de ce dernier pourrait être la cause d'un déficit de lecture. D'autres auteurs par contre considèrent que les deux pathologies ne sont pas directement liées ; en effet les troubles du langage oral ne provoqueraient un retard de lecture que dans 20% des cas, en tout cas sur le plan du déchiffrage. De même, des dissociations ont pu être observées entre ces deux types de déficits comme par exemple dans le cas d'hyperlexie où un langage altéré coexiste avec des capacités supérieures du décodage en lecture (Van Hout et Estienne 2001). Renée Cheminal (2002) précise néanmoins que certains troubles du langage oral font partie du tableau clinique. Il s'agit là de problèmes spécifiques tels que la conscience métaphonologique, la dénomination et l'accès rapide au vocabulaire en mémoire. Elle ajoute que des difficultés de compréhension du langage oral peuvent retentir sur la compréhension du langage écrit. Dans cette lignée, Bishop et Snowling (2004) défendent l'idée d'un trouble commun, un « Specific Language Impairment », qui aurait une origine phonologique et qui pourrait avoir pour conséquence des difficultés à la fois dans l'apprentissage du langage oral et du langage écrit.

**La dyscalculie.** Le trouble du calcul est beaucoup moins bien connu et étudié que les autres troubles d'apprentissage. Sa prévalence chez les enfants dyslexiques est très variable en fonction des études (2<sup>ième</sup> trouble associé pour Habib (2003) alors qu'aucun cas n'est reporté dans l'étude épidémiologique de Cuvellier et coll. (2004). Cette différence est probablement due entre autres au fait qu'il n'existe pas de définition ni de critères diagnostiques universellement admis. Il semble toutefois que le trouble isolé du calcul soit plus rare que la dyslexie mais qu'il est souvent associé à cette dernière.

**Les troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H).** Dans la population étudiée par Cheminal (2002), les troubles attentionnels semblent associés à la dyslexie dans 50% des cas. Il s'agit généralement de troubles de l'attention sans hyperactivité. Van Hout et Estienne (2001) nous disent que pour les troubles de l'attention aussi les points de vue varient bien qu'ils ne soient apparemment jamais envisagés comme facteurs d'exclusion. Certains auteurs parlent d'un sous-groupe particulier de dyslexie, appelé dys-

lexie plus, lorsque le trouble attentionnel est présent. D'autres incluent le trouble attentionnel dans leur distinction entre dyslexie développementale quand ce trouble est absent et dyslexie avec MBD, c'est-à-dire signes de dysfonction cérébrale minime (« Minimal Brain Dysfunction »), quand il est présent (Van Hout et Estienne 2001).

**Les troubles d'acquisition des coordinations.** La caractéristique essentielle du TAC est une perturbation marquée du développement de la coordination motrice. D'après Breton et Léger (2007), ce trouble entraîne des difficultés plus ou moins sévères dans l'élaboration et l'automatisation des gestes volontaires. L'enfant a alors du mal à planifier, à organiser et à coordonner ses gestes dans le bon ordre pour produire une action nouvelle et adaptée à l'environnement.

**La dysgraphie.** Ce trouble de l'exécution du geste de l'écriture implique des mécanismes multiples et insuffisamment analysés chez les dyslexiques. Toutefois, certains rééducateurs évoquent un geste grapho-moteur maladroit et des difficultés d'ordre visuo-spatial. Il est possible que la difficulté des dyslexiques à créer un lien stable entre un signe et un son gêne la programmation du geste graphique (Cheminal 2002).

**La dyschronie.** Ce trouble de l'organisation temporelle est observé chez 25% des enfants dyslexiques (Habib 2003).

Dans les troubles spécifiques des apprentissages, une autre compétence est souvent déficitaire : la mémoire de travail. Les difficultés peuvent concerner ses différentes composantes :

- La boucle phonologique. Elle sert à maintenir une trace mnésique d'unités phonologiques pendant une période ne dépassant pas 30 secondes. Cette capacité de rétention est très importante quand l'enfant apprend à parler. Selon Baddeley (1986), la boucle phonologique ne serait utilisée en lecture que lorsque la mémoire visuo-spatiale serait saturée ou dans le cadre de la conversion grapho-phonologique. Or, au début de l'apprentissage et chez des enfants dyslexiques, la lecture se fait principalement par ce biais. Le recodage articulatoire de l'information phonologique à retenir, permettant un « rafraîchissement » de l'information, joue probablement un grand rôle à cet égard bien qu'il puisse aussi être à l'origine d'erreurs se cumulant avec les erreurs phonologiques chez le sujet dyslexique. La réinterprétation des données impliquant un trouble de la représentation phonologique comme étant à l'ori-



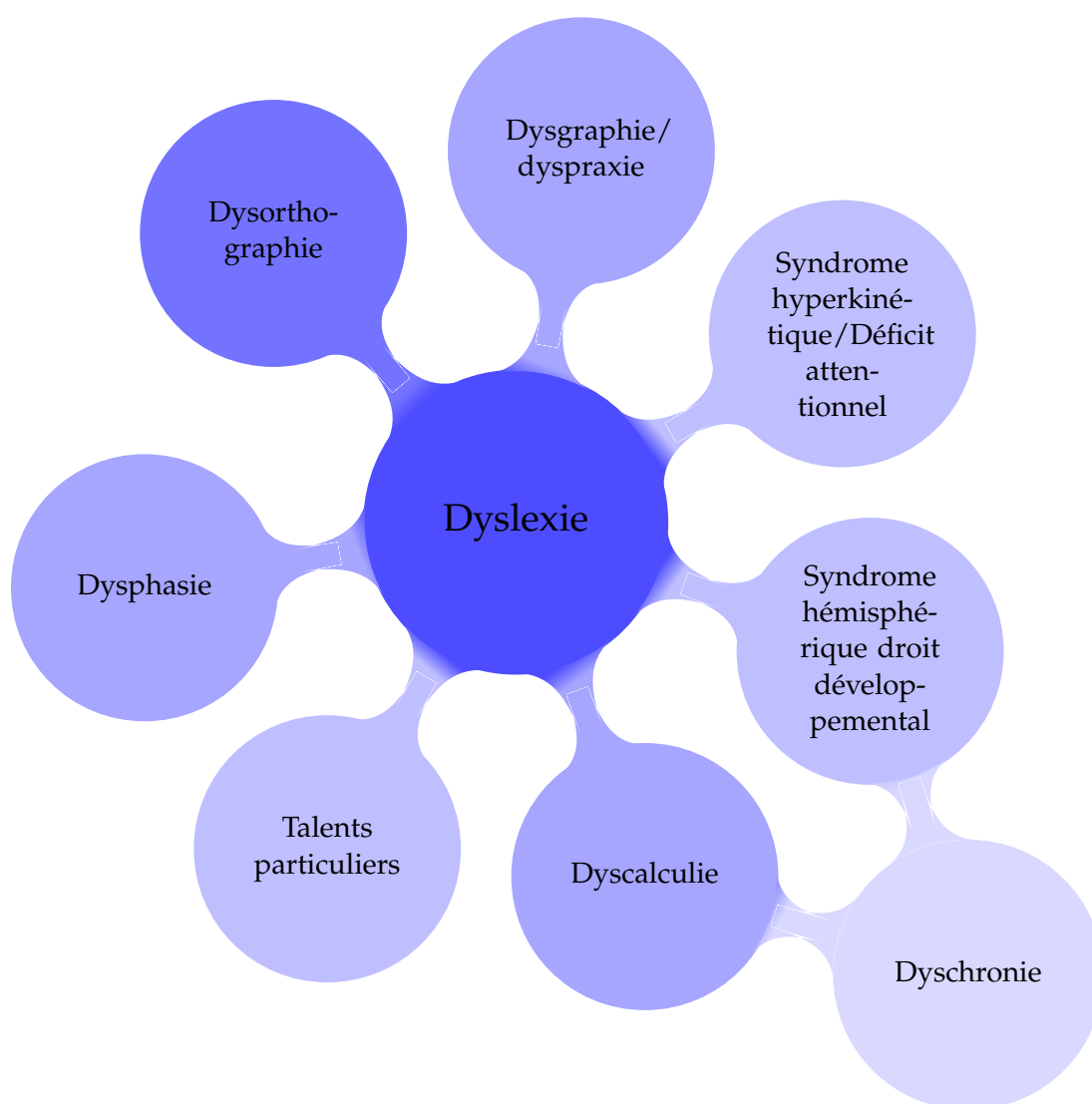


FIGURE 3.1 – Constellation des troubles associés à la dyslexie

gine de nombreux cas de dyslexie, vers un trouble de la mémoire de travail phonologique sera discutée ultérieurement (Démonet et coll. 2004).

- La mémoire visuo-spatiale appelée également calepin visuo-spatial. Cette mémoire permet le stockage d'éléments visuels (formes, couleurs...) pendant une dizaine de secondes. Ce stockage peut être affecté chez des dyslexiques présentant des troubles visuo-attentionnels (voir la section 3.2.4.2).

Avant de présenter les théories explicatives de la dyslexie, il nous semble primordial de préciser qu'un même enfant dyslexique peut souffrir simultanément des différents troubles comorbides pré-cités.

### 3.2.4 Les théories explicatives de la dyslexie

Cette partie sera consacrée à décrire les 4 principales voies de recherche en neurosciences pour expliquer la dyslexie : les théories phonologiques, visuelles, motrices et temporelles. Nous aborderons ensuite les facteurs génétiques des troubles d'apprentissage.

#### 3.2.4.1 Les théories phonologiques.

L'hypothèse d'un déficit des représentations phonologiques dans la dyslexie est celle qui rassemble le plus grand nombre de scientifiques travaillant sur cette pathologie. Le fondement de cette théorie est que la lecture est une activité langagière qui se met en place après la langue orale dans le développement de l'individu. De plus, même si la perception de l'écrit dépend de la vision alors que celle de l'oral dépend de l'audition, le lecteur peut toujours avoir accès à la forme sonore des mots qu'il lit. Enfin, la théorie phonologique s'appuie sur la définition de la dyslexie, qui est un trouble spécifique d'apprentissage de la lecture ne résultant pas, entre autres, de déficiences sensori-motrices avérées. Ces différentes explications permettent de comprendre pourquoi l'activité de lecture implique surtout les réseaux neuronaux utilisés pour traiter le langage oral.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'acquisition de la lecture passe par une étape d'apprentissage et d'utilisation des règles de conversion grapho-phonémiques. Or, ce qui caractérise la plupart des dyslexiques, c'est une sévère difficulté de mise en oeuvre et d'automatisation de ce décodage. Nous savons que le déficit de la procédure phonologique de lecture est robuste et prévalent. D'après la théorie phonologique classique, il s'explique principalement par des déficiences d'analyse phonémique et de mémoire à court terme phonologique, voire par des difficultés de précision et de rapidité d'accès au lexique oral. D'autres hypothèses phonologiques attribuent ces déficits à une déficience auditive sous-jacente ou à une perception des phonèmes défaillante.

**La théorie phonologique « classique »** explique les difficultés des dyslexiques en lecture de mots nouveaux par leurs faibles habiletés phonologiques affectant entre autres, l'analyse phonémique et la mémoire à court terme phonologique. L'utilisation de la procédure de décodage implique la mise en correspondance des unités sub-lexicales de l'écrit, les graphèmes, avec les unités correspondantes de l'oral, les phonèmes. Cette première opération nécessite des capacités d'analyse phoné-

mique. Ensuite, les unités résultant de ce décodage seront assemblées pour accéder aux mots ce qui requiert la mémoire phonologique à court terme. Le décodage peut donc difficilement être utilisé par un enfant incapable d'extraire les phonèmes et souffrant en plus d'un déficit mnésique (Mann et Liberman 1984). Ce type de déficit proviendrait donc d'un déficit cognitif spécifique, de nature phonologique (Snowling 2000).

La mise en évidence récente de déficits de précision et de rapidité dans l'accès au lexique (Levy et coll. 1999, Wolf et coll. 2000), évaluées par des tâches de dénomination rapide, a amené certains auteurs à postuler qu'il y aurait deux sources indépendantes expliquant les déficits en lecture des dyslexiques. L'une serait reliée aux compétences d'analyse et de mémoire phonologiques (évaluées par la précision de la réponse) tandis que l'autre serait reliée à l'accès lexical (évalué par le temps de réponse dans des tâches de dénomination rapide d'images d'objets, de couleurs, de suites de nombres ou de lettres). La réussite aux tâches de dénomination rapide semble expliquer une part unique de la variance en lecture indépendamment des tâches d'analyse et de mémoire phonologiques. De plus, les capacités d'analyse phonologique et de dénomination rapide ne sont pas reliées aux mêmes compétences de lecture, la première expliquant la précision de la réponse, la seconde le temps de traitement. Il est actuellement largement admis que les tâches de dénomination d'images, d'objets ou de couleurs permettent d'évaluer la précision et la rapidité de l'accès au lexique. Ce type de compétences phonologiques pourrait permettre à l'enfant en phase de décodage d'accéder rapidement et précisément au mot oral correspondant à la forme écrite proposée, et donc faciliter la création de liens entre code orthographique et code phonologique des mots.

L'hypothèse phonologique tire son origine des études de groupe de dyslexiques ayant montré la présence d'un déficit phonologique chez une majorité de sujets (Snowling 2000). Ramus et coll. (2003) ont fait passer une batterie de tests phonologiques et moteurs à des enfants dyslexiques. Les résultats ont montré que 77% de leurs sujets avaient un déficit phonologique contre 59% présentant des difficultés motrices. De plus, ces derniers avaient généralement des troubles attentionnels ou comportementaux associés.

La communauté scientifique semble s'accorder sur le fait que les troubles phonologiques sont partagés par la majorité des dyslexiques mais il n'est pas admis par tous les auteurs que des représentations phonologiques affectées seraient l'unique explication de la dyslexie. Une réinterprétation des données par Démonet et coll. (2004) et par Ramus et Szenkovits (2008) suggère que les déficits observés relè-

veraient plutôt d'un **trouble de la mémoire de travail phonologique** (systématiquement impliquée dans les tâches dites de conscience phonémique, d'autant plus qu'elles consistent dans la manipulation de plusieurs phonèmes dans des segments assez longs).

Par ailleurs, les analyses de régression (White et coll. 2006, Ramus 2003) indiquent que les capacités phonologiques sont les seules qui expliquent la majeure partie de la variance en lecture. Les études longitudinales signalent que ce sont les capacités phonologiques, en particulier celles d'analyse phonémique, qui sont les meilleurs prédicteurs du futur niveau de lecture des enfants, des entraînements dans ce domaine ayant une incidence positive sur la lecture (Scarborough 1998).

Comme nous venons de le voir, le facteur « phonologie » regroupe des capacités assez diverses : précision et rapidité de l'accès au lexique, mémoire à court terme phonologique et capacités d'analyse d'unités phonologiques de différentes tailles (syllabe, rime et phonème) de façon plus ou moins explicite (par exemple, fluence verbale à partir d'un indice phonologique versus manipulation de phonème). Dès lors, il a été proposé que les déficits relevés dans ces différents domaines pourraient s'expliquer par un facteur sous-jacent, soit un déficit des traitements auditifs rapides, soit un déficit de discrimination des phonèmes.

Selon certains chercheurs, la théorie d'un déficit phonologique proviendrait d'un **trouble du traitement acoustique** et plus spécifiquement des transitions temporelles rapides en perception auditive, qu'il s'agisse de perception du langage ou non. Les premières études dans ce domaine ont été effectuées par Paula Tallal (Tallal et Piercy 1973, Tallal 1980) sur des enfants dysphasiques dans un premier temps et dyslexiques par la suite. Elle utilise des tâches de discrimination (le sujet doit dire si 2 stimuli présentés successivement sont identiques) et de jugement d'ordre temporel (le sujet doit reproduire les 2 sons dans l'ordre présenté). Les stimuli pouvaient être verbaux ou nonverbaux, courts ou longs, des voyelles brèves ou longues ainsi que des syllabes de type /ba/-/da/. La durée des intervalles inter-stimuli était longue ou courte. Les résultats montrent des scores inférieurs chez les dysphasiques pour les tons courts, les voyelles brèves ou les transitions consonne-voyelle brèves, surtout quand les intervalles entre les stimuli sont courts. Pour les dyslexiques, seules les tâches impliquant les sons nonverbaux ont été réalisées. Leurs performances sont moins bonnes que celles des normolecteurs mais uniquement pour les intervalles courts. Toutefois cette étude a été critiquée pour l'hétérogénéité des variables étant donné que la nature même des stimuli ne permet pas de distinguer les 3 caractéristiques impliquées dans le traitement tempo-

rel : l'ordre d'apparition des stimuli, leur durée individuelle et la rapidité de leur succession (c'est-à-dire l'intervalle entre deux stimuli) (Studdert-Kennedy et Mody 1995). À la suite de cet article, des expériences ont tenté de reproduire les résultats originaux de Tallal, d'évaluer séparément l'incidence des trois dimensions temporelles sur les performances en lecture et enfin de vérifier si le type de déficit mis en relief par Tallal ne serait pas en fait spécifique au traitement du langage vu que ce sont justement des sons très brefs (comme les bruits d'explosion des consonnes occlusives), et des transitions rapides (les transitions consonne-voyelle) qui sont à la base de la perception des phonèmes. Deux revues de la littérature (Ramus et coll. 2003, Rosen et Manganari 2001) signalent qu'il est maintenant de plus en plus clair que les troubles auditifs, lorsqu'ils sont présents, ne sont pas liés à la rapidité de la succession des stimuli auditifs. Tout d'abord, parmi les études qui ont utilisé les mêmes tâches que celles de Tallal, plusieurs n'ont pas permis de relever que le déficit des dyslexiques était limité aux intervalles brefs (Reed 1989, Nitttrouer 1999, Share et coll. 2002). D'autres études utilisant d'autres tâches telles que la détection du nombre de sons en fonction de la durée de l'intervalle, n'ont pas permis de soutenir cette hypothèse avec une tendance du sujet à n'entendre qu'un seul son quand l'intervalle est court (McAnally et Stein 1996, Schulte-Körne et coll. 1998; 1999, Ahissar et coll. 2000).

En ce qui concerne la spécificité linguistique, plusieurs études se sont attachées à trancher entre l'existence d'un déficit auditif ou d'un déficit limité au traitement du langage. Mody et coll. (1997) ont utilisé des sons verbaux et non verbaux aussi proches que possible quant à leurs caractéristiques acoustiques. Les sons verbaux étaient des syllabes de type /ba/-/da/ et les sons non verbaux ont été construits à partir de ces mêmes syllabes. Le raccourcissement de l'intervalle inter-stimuli ne montre des effets délétaires chez les faibles lecteurs que lorsque la tâche implique les sons verbaux. D'autres chercheurs (Serniclaes et coll. 2001, Dufor et coll. 2007) ont testé la spécificité linguistique du déficit de perception des phonèmes à l'aide d'analogues sinusoïdaux de sons de parole variant le long d'un continuum de lieu d'articulation de /ba/ à /da/. Les mêmes sons sont présentés en condition non parole, où l'auditeur est naïf et perçoit ces sons comme de simples sifflements et en condition parole où le sujet est informé du fait que les stimuli sont des syllabes (/ba/ ou /da/). Le sujet devait dire si les deux sons qu'il entendait étaient ou non identiques. Les résultats soulignent des différences entre les dyslexiques et les normo-lecteurs principalement en condition parole. D'autres études comparant dyslexiques et normo-lecteurs n'ont observé aucune différence dans deux tâches

impliquant des aspects sonores non langagiers, alors que les performances de ces deux groupes différaient pour la discrimination de sons de la parole (Schulte-Körne et coll. 1999).

Une autre hypothèse sur l'origine du déficit phonologique ne concerne non plus le processus d'isolation du phonème mais plutôt la discrimination de celui-ci : **la théorie allophonique**. Le phonème est le résultat d'un découpage arbitraire et spécifique à une langue. Dans un continuum acoustique, on catégorise, ce qui veut dire que l'on perçoit toute une gamme de sons acoustiquement différents comme /p/ et d'autres comme /t/ ou /k/. Le répertoire des phonèmes diffère d'une langue à l'autre, /b/ et /v/ sont par exemple deux phonèmes différents en français mais pas en espagnol. Il a été montré que le bébé est prédisposé à percevoir différentes oppositions phonétiques susceptibles d'intervenir dans les langues du monde (Kuhl 2004) mais que ce répertoire se restreint aux catégories phonémiques nécessaires à sa langue orale, ce qui implique un processus de sélection, et de restructuration des catégories phonétiques initiales. Processus qui pourrait ne pas avoir été bien mené à terme chez les futurs dyslexiques, tout au moins chez certains d'entre eux. De fait, différents résultats suggèrent que les dyslexiques discriminent moins bien que les normo-lecteurs les phonèmes de différentes catégories mais qu'ils perçoivent mieux qu'eux certaines différences intra-phonémiques, ce double déficit ne provenant pas de déficiences des mécanismes auditifs en amont (Mody et coll. 1997, Schulte-Körne et coll. 1999, Rosen et Manganari 2001, Serniclaes et coll. 2001). Cela suggère que les performances des dyslexiques sont, sous certains aspects, supérieures à celles des normolecteurs (cf. la perception des différences intra-catégorielles). Ce phénomène a été examiné en détail par Serniclaes et coll. (2004) dans une étude consacrée à l'examen des capacités de catégorisation du trait de voisement (VOT= intervalle de temps entre la détente et l'occlusion orale et le départ des vibrations laryngées) sur des dyslexiques de 9 ans, des normolecteurs de même âge et des adultes. Ils ont montré que les performances des dyslexiques se caractérisent par un pic de discrimination plus faible à la frontière phonémique (vers +15 ms de VOT), ce qui signale une nouvelle fois qu'ils ont un déficit de catégorisation phonémique. De plus, un second pic intra-catégoriel, de même amplitude que le premier, est observé chez les dyslexiques aux environs de -30 ms de VOT. Ce pic visible en intra catégorie est dit allophonique car il se situe au niveau d'une des trois frontières de voisement repérées dans les langues à trois catégories de VOT (le « thai » par exemple). Il correspond à l'une des prédispositions phonétiques du nouveau-né utilisée pour percevoir le voisement. La sensibilité ac-

crue des dyslexiques aux composants phonétiques des oppositions phonémiques suggère que l'on se trouve en présence d'un mode de perception de la parole particulier. Le double « déficit » de perception catégorielle des dyslexiques peut gravement entraver l'acquisition du langage écrit : pour relier les graphèmes aux phonèmes correspondants, il faut en effet des catégories phonémiques bien spécifiées. Si le dyslexique perçoit moins bien des différences entre deux phonèmes de sa langue et qu'il perçoit des allophones d'un même phonème, qui ne font pas partie du répertoire de sa langue, il va difficilement pouvoir relier les phonèmes aux graphèmes correspondants. Ce mode particulier de perception pourrait également expliquer les déficits de manipulation des phonèmes rencontrés par les dyslexiques dans les tâches classiques d'analyse phonémique. Il pourrait aussi rendre compte des déficits de mémoire à court terme phonologique, qui seraient dus au poids des exigences de stockage s'expliquant par un répertoire élargi, allophonique plutôt que phonémique. Enfin, il pourrait expliquer certaines difficultés d'accès au lexique telles que mises en relief par les tâches de dénomination sérielle rapide. D'où la possibilité d'un syndrome sous-jacent aux différents déficits intégrés dans le cadre de l'explication phonologique classique de la dyslexie. Ces résultats apportent des arguments nouveaux à l'appui de l'hypothèse explicative de la dyslexie par un déficit phonologique. Des études complémentaires sont toutefois nécessaires, pour évaluer la prépondérance de ces déficits, leur pouvoir explicatif et les relations qu'ils entretiennent avec les autres déficits phonologiques.

Au niveau neuro-anatomique, on sait qu'en lecture, le circuit dorsal qui inclut les aires temporo-pariétales, particulièrement le gyrus angulaire et le gyrus supramarginal (probablement dédiés aux traitements impliquant la phonologie), est relativement lent et prédomine au début de l'apprentissage. Les études sur les corrélats neuronaux des traitements phonologiques dans des tâches n'impliquant pas la lecture (analyse phonémique et mémoire à court terme phonologique) ont montré des activations réduites des aires périsylviennes gauches (plutôt que bilatérales) chez les dyslexiques, ces hypo-activations concernant surtout le gyrus supramarginal gauche (voir Démonet et coll. (2004) pour une revue). Un pattern similaire a été relevé quand les dyslexiques ont eu à effectuer des tâches implicites de discrimination de contrastes phonémiques (Ruff et coll. 2002, Dufor et coll. 2007), alors même que leurs compétences semblaient non détériorées en comportemental, ce qui suggère l'existence de mécanismes compensatoires.

Dans cette section, nous avons développé plusieurs arguments en faveur de l'hypothèse phonologique : des déficits phonologiques ont été relevés de façon consistante

dans les études de groupes et ces déficits sont prévalents, cette hypothèse permet d'expliquer les performances en lecture des dyslexiques et des dysfonctionnements neuronaux ont principalement été relevés dans les aires cérébrales impliquées dans le traitement du langage (aires périsylviennes gauche), ces dysfonctionnements se manifestant surtout par des hypo-activations des aires dédiées aux traitements phonologiques. Bien qu'un nombre conséquent de recherches témoigne de l'importance incontestable des compétences phonologiques pour l'apprentissage de la lecture (Ehri 2002) et qu'un trouble phonologique soit classiquement décrit dans le contexte de certaines dyslexies, il semble cependant excessif de réduire la diversité des troubles dyslexiques à cette seule dimension.

### **3.2.4.2 Les théories visuelles.**

Pringle Morgan fut le premier à décrire un cas de dyslexie alors mentionné comme une « cécité congénitale » pour lire. Depuis, de nombreuses études évaluant les capacités de traitement visuel des enfants dyslexiques tendent à montrer que nombre d'entre eux présentent un déficit des traitements visuels indépendamment de toute atteinte sensorielle (ou périphérique). Une assez grande diversité de troubles des traitements visuels a été décrite chez les individus dyslexiques, la question cruciale étant bien sûr de savoir dans quelle mesure ces troubles sont reliés à l'activité de lecture et peuvent être tenus pour responsables des difficultés d'apprentissage de la lecture de ces enfants. Le lien de causalité n'est pas encore établi mais plusieurs types de déficits visuels ont été observés chez les dyslexiques et les études tendent de circonscrire à la fois la diversité des traitements visuels déficitaires chez ces enfants et leur réel impact sur l'apprentissage de la lecture.

L'hypothèse qui a donné lieu au nombre le plus important de recherches dans le domaine visuel est l'hypothèse d'une atteinte du système visuel magnocellulaire. Elle a été fortement critiquée et est encore largement débattue. Les systèmes magnocellulaire et parvocellulaire correspondent aux deux couches de cellules du corps géniculé latéral (lien entre le tractus optique et l'aire visuelle primaire du cortex occipital). Le système magnocellulaire est composé des dix pour cent de cellules ganglionnaires sensiblement plus grosses que les autres, davantage myélinisées et pourvues d'axones permettant une transmission rapide de l'information (Shapley et Perry 1986). Ces cellules dont le champ récepteur est plus large que celui des cellules parvocellulaires répondent essentiellement aux stimuli de faible fréquence spatiale et de haute fréquence temporelle. Ce système est particulière-



ment impliqué dans le traitement des faibles contrastes permettant une analyse grossière des stimuli plutôt que l'analyse des détails subtils d'un objet à des fins d'identification. Une autre caractéristique importante du système visuel magnocellulaire est sa capacité à traiter le mouvement et les changements rapides ; les cellules magnocellulaires répondent ainsi à tout nouvel événement apparaissant dans le champ visuel, qu'il s'agisse de flashes lumineux ou d'une cible en mouvement. Essentiellement impliqué dans le traitement des formes grossières, des informations périphériques, des stimuli brefs et en mouvement, le système magnocellulaire semble a priori peu adapté à l'activité de lecture qui requiert au contraire d'analyser en détail une information stable présentée en vision centrale. Dans cette activité, le système parvocellulaire gère les informations prises lors de la fixation oculaire tandis que le système magnocellulaire est activé lors de la saccade par le mouvement apparent de l'image. Son activation aurait un effet inhibiteur sur le système parvocellulaire empêchant ainsi l'effet de défilement ou de travelling rétinien, favorisant le traitement de nouvelles informations par « sauts » successifs. Un grand nombre de données comportementales ont été publiées et plaident en faveur d'une atteinte du système visuel magnocellulaire chez les dyslexiques (adultes ou enfants) (Livingstone et coll. 1991, Stein et Walsh 1997). Il a ainsi été montré que les dyslexiques présentent une moindre sensibilité aux faibles fréquences spatiales et aux hautes fréquences temporelles (Lovegrove et coll. 1986) ainsi qu'une sensibilité réduite aux points en mouvement (Cornelissen et coll. 1995). Mais comment ce trouble du système magnocellulaire peut-il expliquer les difficultés de lecture ? Selon cette hypothèse magnocellulaire, pendant la lecture, le système magnocellulaire des dyslexiques ne parviendrait pas à inhiber lors de la saccade l'image « créée » par le système parvocellulaire lors de la fixation précédente. Il se produit ainsi un brouillage qui compromet la reconnaissance des lettres et des mots. Cela expliquerait les erreurs de type inversions de lettres (« pal » lu /pla/) ou les substitutions de lettres formellement proches (« b » et « d », « p » et « q » ...). Malgré son succès et son intérêt indéniables, l'hypothèse magnocellulaire est aujourd'hui controversée. Skottun (2000) affirme que l'hypothèse d'un trouble visuel magnocellulaire est compatible avec un certain nombre de données comportementales relatives à la sensibilité aux contrastes à basse fréquence spatiale ou haute fréquence temporelle mais des articles, beaucoup plus nombreux, démontrent l'absence de tels problèmes de sensibilité ou la présence d'un trouble de la sensibilité aux contrastes dans des zones de fréquence qui ne dépendent pas du système magnocellulaire. Toutefois, l'hypothèse d'une atteinte spécifique du système visuel magnocellulaire

s'est peu à peu étendue vers un trouble amodal des systèmes magnocellulaires auditifs et visuels. Les études mentionnant une atteinte du système visuel magnocellulaire concluent qu'une majorité d'enfants dyslexiques (environ 70%) présentent un tel trouble (Stein et coll. 2000). Sachant qu'il est par ailleurs établi que bon nombre de dyslexiques présentent un trouble phonologique, il s'ensuit nécessairement qu'une forte proportion de ces enfants présente à la fois des difficultés phonologiques et visuelles. De plus, plusieurs études ont montré que les troubles visuels magnocellulaires ne s'observaient que chez les enfants dyslexiques présentant un trouble phonologique associé (Spinelli et coll. 1997, Cestnick et Coltheart 1999). Cette co-occurrence entre troubles phonologiques et visuels a conduit Stein (2003) à proposer une explication alternative : un déficit magnocellulaire amodal touchant à la fois les sphères auditive et visuelle. Les enfants dyslexiques auraient du mal à traiter les informations temporelles rapides visuelles et auditives suite à l'atteinte conjointe des systèmes magnocellulaires visuel et auditif. Des résultats ont permis de conforter cette hypothèse. En effet, des corrélations entre les seuils de détection auditifs et visuels et entre ces seuils et les performances en lecture de pseudomots ont été mis en évidence chez des jeunes adultes dyslexiques (Witton et coll. 1998). Les auteurs ont conclu à une atteinte du système visuel magnocellulaire et à un déficit de traitement des informations temporelles auditives similaire à ce qui était observé au niveau visuel. Toutefois, une forte variabilité de performance était mise en évidence chez les sujets dyslexiques de cette étude dont seuls quelques uns présentent un déficit marqué de détection des seuils tant en visuel qu'en auditif. La théorie magnocellulaire reste donc fortement controversée entre autre par le manque de relation causale entre déficit magnocellulaire et lecture.

Un autre versant des recherches sur les causes explicatives de la dyslexie concerne l'attention visuelle. **L'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle** a été essentiellement confortée par nombre d'études utilisant le paradigme de recherche d'une cible parmi des distracteurs. Dans ce type de tâche, les participants sont confrontés à deux conditions expérimentales. Dans la première, dite condition automatique, la cible est évidente et « saute aux yeux » car elle ne se distingue des distracteurs que par un attribut spécifique : un trait visuel (chercher une lettre Q parmi des O) ou une couleur (chercher une barre rouge parmi des barres bleues). Les temps de réponse sont rapides et ne varient pas en fonction du nombre de distracteurs. On parle ici de phénomène de pop-out. En revanche, en condition attentionnelle, la cible ne se distingue des distracteurs par aucun trait spécifique (chercher un O parmi des Q, ou chercher une ligne verticale rouge parmi des lignes horizontales

rouges et des verticales bleues). Retrouver cette cible nécessite un traitement sériel attentionnel si bien que les temps de réponse augmentent avec le nombre de distracteurs. Ces conditions divergent principalement par les capacités attentionnelles mobilisées. En effet, la condition automatique ne requiert que peu d'attention tandis qu'en condition attentionnelle, des capacités de focalisation, de désengagement et de déplacement attentionnels sont indispensables. Toutes les études ayant utilisé ce paradigme expérimental ont montré que les enfants dyslexiques présentaient des difficultés spécifiques à la condition attentionnelle où les performances se caractérisent par des temps de recherche par item anormalement longs (Iles et coll. 2000). Les dyslexiques pourraient donc avoir des problèmes de focalisation attentionnelle, de désengagement ou de déplacement de l'attention.

Plus récemment, le déficit visuo-attentionnel a été décrit à travers un phénomène de « mini-négligence » gauche (Facoetti et Molteni 2001, Hari et coll. 2001). Lorsqu'on présente des cibles simples (point ou croix) dans les hémichamps droit ou gauche, les temps de réaction sont beaucoup plus longs à gauche qu'à droite pour les dyslexiques (Facoetti et Molteni 2001). Cette différence entre hémichamps est également mise en évidence dans des épreuves de jugement d'ordre temporel (juger laquelle de deux barres présentées à droite et à gauche du point de fixation est apparue la première) ou dans des tâches d'illusion d'accroissement de lignes vers la droite ou vers la gauche. Les dyslexiques, présentent contrairement aux témoins un biais de réponse droit dans ces deux types d'épreuves, suggérant une difficulté d'orientation de l'attention vers la gauche. Cette mini-négligence gauche s'accompagne d'une hyper-sensibilité aux stimuli apparaissant dans le champ visuel droit suggérant un déficit d'inhibition droite les empêchant de désengager leur attention pour la porter vers un autre processus (Facoetti et Molteni 2001, Facoetti et coll. 2003). D'autres données en condition indicée (apparition d'un indice juste avant l'apparition de la cible) montrent que les dyslexiques mettent plus de temps à engager leur attention du côté indicé (Facoetti et coll. 2000, Facoetti et Molteni 2001) et, une fois engagée, il leur serait plus difficile de la désengager (Facoetti et coll. 2003). L'hypothèse d'un phénomène « d'extinction attentionnelle » (attentional blink) plus long chez les dyslexiques a été proposé par Hari et coll. (1999).

Ces différentes études témoignent indéniablement de troubles visuo-attentionnels dans la dyslexie mais qui pourraient ne se manifester que pour certains types de dyslexie. En effet, les études qui ont pris en compte les profils cognitifs des enfants dyslexiques ont montré que seuls les dyslexiques phonologiques présentaient des troubles visuo-attentionnels (Facoetti et coll. 2003). Ce résultat peut paraître sur-

prenant mais s'expliquerait par le fait qu'un trouble visuo-attentionnel, de types défaut de focalisation attentionnelle et difficulté de désengagement, devrait plus particulièrement affecter la procédure analytique de lecture (Facoetti et coll. 2009). Lire un pseudomot long nécessite en effet de focaliser son attention sur la première partie de la séquence orthographique puis désengager son attention afin de la réengager sur la partie suivante de la séquence et ainsi de suite jusqu'au traitement de l'ensemble des lettres. Toutefois, étant donné que les troubles visuo-attentionnels sont observés uniquement dans les dyslexies phonologiques, on peut envisager que les difficultés en lecture de pseudomots pourraient être secondaires au trouble phonologique et non au trouble visuo-attentionnel.

Par ailleurs, d'autres études ont conduit à remettre en question l'idée d'un trouble spécifique à la modalité visuelle en montrant des difficultés similaires de traitement en modalité auditive, voire même tactile (Facoetti et coll. 2005; 2008; 2009). Ceci a conduit à faire l'hypothèse d'un trouble amodal de l'attention perceptive. Les résultats de plusieurs études menées en modalité auditive ont montré que les dyslexiques ont des difficultés à discriminer les phonèmes en présence d'un bruit de fond (Cunningham et coll. 2001) et à traiter les séquences rapides de stimuli auditifs (Hari et coll. 2001). Plusieurs études appuient un déficit d'attention en modalité auditive caractérisé par une difficulté à déplacer rapidement et focaliser l'attention auditive (Hari et coll. 2001). Facoetti et coll. (2005) présentent des données supportant l'idée d'un déplacement attentionnel ralenti à la fois en modalité visuelle et auditive, en montrant, en condition indicée, que les dyslexiques ne présentent pas d'effet facilitateur significatif lorsque l'intervalle qui sépare l'indice de la présentation de la cible est court tandis que cet effet est observé pour des intervalles longs. Le pattern inverse est constaté chez les normo-lecteurs avec un effet facilitateur pour l'intervalle court mais pas pour l'intervalle long. Ceci suggère donc une capture attentionnelle rapide et un désengagement attentionnel immédiat chez les normolecteurs alors que les dyslexiques ne parviendraient à engager leur attention que beaucoup plus lentement. Hari et coll. (2001) ont proposé une théorie du déplacement attentionnel ralenti (*Sluggish Attentional Shifting Theory*) : une capture attentionnelle ralentie et une difficulté de désengagement attentionnel se traduiraient chez les dyslexiques par une difficulté à traiter les informations temporelles rapides dans toutes les modalités.

Avant de poursuivre, il nous semble primordial de préciser que les déficits visuo-attentionnels des dyslexiques ne se situent pas dans le contexte d'un trouble attentionnel général similaire à celui décrit dans le cadre des troubles déficit de l'atten-

tion/hyperactivité (TDA/H).

Une autre hypothèse a vu le jour dans le champs visuo-attentionnel et concerne une forme particulière de dysfonctionnement : le **trouble de l'empan visuo-attentionnel**. Ces difficultés seraient associées à certaines dyslexies et pourraient s'observer indépendamment de toute atteinte phonologique (Bosse et coll. 2007). L'empan visuo-attentionnel renvoie à la quantité d'informations qui peuvent être traitées simultanément au sein d'une séquence d'éléments distincts. En lecture, cette notion renvoie au nombre de lettres du mot qui peuvent être identifiées au cours d'une seule fixation. Elle s'inscrit dans le cadre du modèle connexionniste de lecture multitraces décrit dans la section 2.4.1.2 (Ans et coll. 1998, Valdois et coll. 2004). Ce modèle postule l'existence d'une fenêtre attentionnelle de taille variable à travers laquelle est extraite l'information orthographique du mot à lire. Une lecture globale du mot nécessite que la fenêtre visuo-attentionnelle s'adapte à la longueur du mot de façon à traiter simultanément l'ensemble des lettres qui le composent. Pour le traitement séquentiel analytique, la fenêtre visuo-attentionnelle est réduite et cadre successivement les unités orthographiques (syllabes, graphèmes) qui composent la séquence à déchiffrer. La fenêtre visuo-attentionnelle correspond à l'ensemble des éléments de la séquence sur lesquels se focalise l'attention visuelle lors du traitement. Afin d'évaluer l'empan visuo-attentionnel, des tâches de reports global et partiel ont été utilisées. Elles consistent à présenter sur un écran d'ordinateur des séquences imprononçables de 5 consonnes (par exemple : R H S D M) pendant un temps très court (pour éviter toute refixation) et à demander aux sujets de dénommer les lettres vues. En report global, toutes les lettres doivent être rapportées indépendamment de leur position. Au report partiel, une barre verticale apparaît sous une des lettres et seule celle-ci doit être dénommée. En 2003, Valdois et coll. (2003) publient une double dissociation avec le cas d'un jeune dyslexique de 14 ans qui présente toutes les caractéristiques d'une dyslexie de surface (trouble sélectif de la lecture et de l'écriture des mots irréguliers) en l'absence de trouble phonologique associé. Ses performances aux tâches de report sont en revanche atypiques avec des résultats dans la norme uniquement dans 2 positions (en position 1 et 3). Cet adolescent présente donc une réduction de l'empan visuo-attentionnel en l'absence de trouble phonologique associé. À l'inverse, un autre jeune dyslexique a des résultats dans la moyenne à ces épreuves de reports et ne présente donc aucun trouble objectivable de l'empan visuo-attentionnel. En revanche, ses performances sont très faibles aux tâches impliquant un traitement phonologique et son profil de lecture correspond à une dyslexie plutôt phonologique (trouble sélectif de la lecture et de

l'écriture des pseudomots). Une étude de groupes a permis de généraliser ces résultats, en montrant qu'une majorité des enfants dyslexiques présentent un trouble isolé soit de la conscience phonologique, soit de l'empan visuo-attentionnel (Bosse et coll. 2007). Cette étude portait sur des dyslexiques de langues maternelles française et anglaise et souligne donc que le déficit visuo-attentionnel est indépendant des caractéristiques de la langue. De plus, ces auteurs ont montré une forte corrélation entre les performances des dyslexiques aux épreuves visuo-attentionnelles et leur niveau de lecture sans corrélation entre les tâches visuo-attentionnelles et métaphonologiques. De plus, les capacités de traitement visuo-attentionnel étaient prédictives du niveau de lecture indépendamment des capacités de traitement phonologique ce qui suggère qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel contribue de façon spécifique au faible niveau de lecture des enfants dyslexiques.

Ces recherches conduisent à penser qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel pourrait être à l'origine de certaines formes de dyslexies qui ne sont pas associées à un déficit phonologique. La relation causale entre le déficit de l'empan visuo-attentionnel et la dyslexie est appuyée par les études de régression multiple mais nécessite d'autres investigations dans le cadre d'études longitudinales ou de rééducation visuo-attentionnelle. Ainsi, il faudrait voir si l'empan visuo-attentionnel évalué avant l'apprentissage de la lecture chez des enfants tout-venant est prédictif de leur niveau ultérieur de lecture ou si un entraînement de l'empan visuo-attentionnel améliore les performances de lecture des enfants dyslexiques. Bien que le lien causal ne soit pas démontré, le déficit de l'empan visuo-attentionnel est compatible avec d'autres hypothèses théoriques récentes insistant sur la complémentarité des dimensions phonologique et visuelle de la lecture (Whitney et Cornelissen 2005).

Les données que nous venons d'exposer montrent que la lecture implique une dimension visuelle et une dimension phonologique dont chacune joue un rôle complémentaire dans l'apprentissage. Elles reposent donc la question de l'origine multifactorielle des troubles dyslexiques.

### **3.2.4.3 La théorie cérébelleuse.**

Partant de l'observation des signes visuels, auditifs et moteurs associés aux difficultés de lecture des dyslexiques, Nicolson et coll. (1995) proposèrent que ces troubles associés pouvaient être liés à un dysfonctionnement du cervelet. Ils avaient constaté que les enfants dyslexiques présentaient des caractéristiques simi-

lares aux manifestations classiques d'une dysfonction du cervelet : un retard de développement moteur, des troubles du traitement séquentiel et temporel (apprentissage de l'heure, des jours de la semaine, etc.), des difficultés de coordination motrice et d'équilibre (Fawcett et Nicolson 1999). Ces auteurs ont tenu compte de l'ensemble des symptômes de dyslexie et ont décrit le tableau caractéristique de dyslexie comme « un déficit des aptitudes phonologiques, des habiletés motrices, de la rapidité du traitement d'information et de l'automatisation (Nicolson et Fawcett 1990) ». Ce dernier point fait référence spécifiquement au rôle du cervelet dans l'apprentissage procédural. Un déficit cérébelleux explique donc les troubles associés dans la dyslexie mais en quoi peut-il être la cause des difficultés de lecture ? Plusieurs explications peuvent être envisagées. En effet, le cervelet est impliqué à la fois dans le contrôle des mouvements oculaires, dans l'attention visuospatiale et dans la vision périphérique, tous ces aspects étant des composantes essentielles de la lecture (Stein et Walsh 1997). De plus, comme nous l'avons déjà signalé, la lecture est un processus automatique et ces processus sont généralement pris en charge par le cervelet. Les enfants dyslexiques présenteraient donc une incapacité (au moins partielle) à automatiser le processus de lecture (Ramus et coll. 2003) passant par la mémorisation de la conversion grapho-phonémique et par la mémorisation d'unités orthographiques complexes et de formes globales. Telle que présentée par Nicolson et coll. (2001), cette théorie explique les déficits phonologiques par un déficit cérébelleux présent dès la naissance et interférant avec la mise en place normale des aptitudes auditives et articulatoires nécessaires à la constitution du système phonologique. De même, le déficit précoce interférerait avec l'élaboration des aptitudes visuelles telles que les mouvements oculaires et la reconnaissance des lettres, expliquant ainsi des difficultés orthographiques caractéristiques du dyslexique.

Parmi les théories postulant un trouble général (non linguistique), celle d'un déficit cérébelleux est particulièrement intéressante mais, aussi séduisante soit-elle, cette théorie a été critiquée sur plusieurs points ces dernières années. D'une part, les troubles moteurs ne se retrouvent pas chez tous les dyslexiques et beaucoup, même avec des difficultés majeures dans l'apprentissage de la lecture, ne manifestent aucune difficulté motrice voire se révèlent particulièrement doués pour les activités motrices, qu'il s'agisse de la motricité globale ou fine. D'autre part, cette théorie cérébelleuse a été mise à mal car elle ne rendrait pas compte de façon immédiate du trouble phonologique. Cependant, des arguments expérimentaux ont été publiés en faveur de l'hypothèse précitée de Nicolson et coll. (2001) selon laquelle

un déficit subtil de la mise en place précoce des aptitudes articulatoires provoquerait un défaut de la boucle articulatoire, altérant la mémoire phonologique à court terme et un trouble de la conscience phonologique.

Etant donné l'état des recherches actuelles, il n'est pas possible de se prononcer définitivement sur la validité et la capacité à rendre compte de la totalité des déficits des dyslexiques de la théorie cérébelleuse. Démonet et coll. (2004) signalent en effet que beaucoup de déficits attribués à une dysfonction cérébelleuse pourraient tout aussi bien être attribués à la dysfonction d'autres structures, en particulier sous-corticales, également impliquées dans les processus de coordination motrice, d'automatisation des procédures, et de régulation temporelle motrice et cognitive. Cette théorie comporte toutefois l'originalité d'avoir véritablement pris en compte les comorbidités de la dyslexie.

#### **3.2.4.4 La théorie du traitement temporel.**

Bien que nous l'ayons déjà évoquée dans la partie consacrée au déficit phonologique et plus précisément au trouble du traitement acoustique, il nous semble indispensable de revenir plus longuement sur le trouble du traitement temporel. Les enfants souffrant de troubles spécifiques des apprentissages ont très souvent des problèmes avec le temps, qu'il s'agisse de la gestion des aspects temporels liés à la réalisation des actes quotidiens, de la conscience et/ou la perception de la durée d'événements, ou encore de la discrimination d'événements brefs, tels que ceux constitutifs de la parole humaine. Le test le plus fréquemment utilisé pour évaluer le traitement temporel est sans conteste le jugement d'ordre temporel (JOT). En 1980, Tallal (1980) étudia les performances d'enfants dyslexiques dans une tâche qui repose sur des jugements de similitude ou d'ordre temporel entre deux stimuli non verbaux (sons complexes), différant seulement par leur fréquence fondamentale. Elle ne retrouva aucune différence entre les dyslexiques et les témoins pour les paires séparées par des intervalles longs (429 ms) tandis que près de la moitié des dyslexiques se trouvaient en dessous de la performance du plus faible contrôle pour des intervalles plus courts (entre 8 et 305 ms). Elle en conclut que le cerveau de ces enfants était en déficit pour traiter les événements brefs et en succession rapide, et non les mêmes éléments séparés par de plus larges intervalles. Dans son interprétation, l'auteur fait également l'analogie entre la valeur de l'intervalle inter-stimulus où ces enfants se trouvent en difficulté, et la durée de certaines composantes du langage articulé, et tout particulièrement les consonnes



occlusives dont la durée normale avoisine 40 ms, expliquant alors les difficultés de certains dyslexiques dans la discrimination des consonnes. Dans cette même étude, une forte corrélation ( $r=0,81$ ) entre la performance des dyslexiques au subtest à intervalles courts et la lecture de pseudomots est rapportée, suggérant un lien très fort entre le déficit de traitement temporel et les mécanismes sous-jacents au déficit de conversion grapho-phonémique. Toutefois, seule la moitié des enfants rencontrait des difficultés d'ordre temporel et seuls les sons non verbaux ont été testés, ne permettant de trancher sur le caractère linguistique ou plus général du problème. A ce propos, Studdert-Kennedy et Mody (1995) ont montré que le déficit de JOT sur des paires de syllabes chez les enfants dyslexiques disparaît si on utilise de la « non-parole » (c'est-à-dire l'équivalent synthétique des mêmes syllabes). De plus, ils ont observé que cette différence entre dyslexiques et contrôles n'existait pas pour toutes les syllabes, suggérant que le déficit observé dépend de caractéristiques intrinsèques aux stimuli, et non de facteurs généraux tels que leur durée.

D'autres arguments ont été apportés à l'encontre d'un déficit d'ordre temporel. Bishop et coll. (1999) ont montré que lorsqu'on compare des couples de jumeaux dyslexiques ou non, il existe une certaine similitude entre jumeaux monozygotes qui permet d'affirmer l'héritabilité du trait au niveau des capacités phonologiques mais pas en JOT. Les dyslexiques ont une performance inférieure au JOT, mais sans aucune héritabilité, ce qui signifie que le trouble du traitement auditif, s'il existe, ne possède pas le même caractère génétique que le trouble phonologique lui-même, ce qui met à mal le lien entre les deux proposé par Tallal. Par ailleurs, Share et coll. (2002) ont proposé le test de répétition de Tallal à une grande cohorte d'enfants et constatent que les déficits observés chez les dyslexiques sont retrouvés aussi pour des intervalles inter-stimuli longs, qu'ils ne diffèrent pas des témoins appariés en âge de lecture et qu'un déficit temporel n'implique pas systématiquement un déficit ultérieur sur des mesures phonologiques ou de lecture.

À l'inverse, plusieurs travaux utilisant le JOT chez le dyslexique vont plutôt dans le sens de l'hypothèse de Tallal. Ainsi, le déficit de jugement d'ordre temporel est mis en évidence aussi quand les deux stimuli sont des phonèmes au sein d'un pseudomot (/apsa/versus/aspa/) et ce déficit s'amenuise si les deux consonnes de ce même pseudomot étaient ralenties (Rey et coll. 2002). De même, en utilisant le test de répétition de Tallal et en faisant varier la durée des sons (75 ou 250 ms), Heiervang et coll. (2002) n'ont pas observé de différence entre dyslexiques et témoins pour les sons de 250 ms, alors que pour les sons de 75 ms, les dyslexiques se distinguaient des témoins et cette différence s'observait d'autant plus que l'intervalle

était court. Toutefois, ces déficits n'étaient pas corrélés aux épreuves de lecture. Une autre considération importante concerne l'hétérogénéité de ce que regroupe le terme de « déficit temporel ». En effet, le JOT a été souvent étudié et retrouvé déficitaire chez le dyslexique, mais il a rarement été mis en relation avec d'autres aspects du traitement temporel tel que le jugement de durée relative d'un stimulus. Dans des tâches de jugement de durée, les dyslexiques présentaient un déficit significatif par rapport aux normo-lecteurs et ce déficit était significativement corrélé aux performances en lecture (Walker et coll. 2002). La question qu'on peut dès lors se poser est celle du lien entre perception de la durée, jugement d'ordre temporel et conscience phonologique. Daffaure et coll. (2001) ont recherché ce lien et constaté que les deux marqueurs de déficit temporel sont chacun corrélés très significativement avec la performance en conscience phonologique, mais non corrélés entre eux laissant penser qu'ils interviennent de façons séparées sur la performance en conscience phonologique. Dans cette étude, le lien avec le déficit phonologique est mis en évidence avec une corrélation fortement significative même si l'on exclut les sujets témoins. Concernant les discordances entre les différents travaux dans ce domaine, le recrutement des dyslexiques et la nature des tests utilisés doivent être pris en considération. D'autre part, ce travail montre qu'il convient de distinguer différents niveaux de déficit temporel, au moins deux d'entre eux semblant partiellement indépendants : la reproduction d'une succession de stimuli auditifs, et la perception de la durée relative de deux stimuli. Finalement, ces résultats suggèrent que des aspects du traitement temporel aussi différents que la génération d'un rythme, la perception d'une durée, ou encore la reproduction de l'ordre d'une succession, de même que l'utilisation des notions temporelles dans un contexte social, sont probablement sous-tendus par des mécanismes au moins en partie communs (Rubia et Smith 2004), et dont l'efficacité est susceptible d'être altérée chez le dyslexique.

L'hypothèse d'un trouble du traitement temporel a été étudiée non seulement en modalité auditive mais a été étendue aux autres modalités et un déficit amodal a été proposé. Les premières études à ce sujet ont été réalisées chez des enfants souffrant de troubles spécifiques du langage oral et montraient qu'ils avaient des difficultés à identifier quels deux doigts d'une même main étaient touchés simultanément (Tallal et coll. 1985). De même, des adultes dyslexiques étaient déficitaires dans une tâche de détection d'un stimulus vibratoire quand la vibration était de 3 Hz mais pas pour 30 ou 300 Hz (Stoodley et coll. 2000). D'autres auteurs (Witton et coll. 1998, Cestnick et Coltheart 1999, Laasonen et coll. 2000) ont démontré que

le déficit de nature temporelle existe en modalités auditive, visuelle et tactile chez un même individu. Les dyslexiques, enfants et adultes, étaient significativement moins bons dans les tâches de jugement d'ordre temporel dans les 3 modalités et les performances étaient corrélées entre elles.

Ces différentes études sur le déficit du traitement temporel dans la dyslexie montrent qu'il s'agit d'un fait expérimental largement prouvé même si les avis divergent encore tant sur l'acception des termes « déficit temporel » que sur ses liens avec le trouble de la lecture. Ces recherches sont donc intéressantes car elles mettent en avant la co-occurrence, au moins dans une importante proportion des cas, des troubles du traitement temporel et de la lecture. Une investigation sur la nature de leur lien pourrait apporter des avancées majeures dans la compréhension de la dyslexie.

Etant données les controverses sur les hypothèses explicatives de la dyslexie, Ramus et coll. (2003) ont proposé pour la première fois de tester, auprès des mêmes individus, plusieurs de ces théories : la théorie phonologique, la théorie perceptive auditive, la théorie cérébelleuse et la théorie magnocellulaire. Ils ont soumis, 16 étudiants dyslexiques et 16 témoins appariés à une batterie de tests très complète. Les dyslexiques de cette étude présentaient un trouble phonologique caractérisé par des troubles métaphonologiques, des capacités limitées de mémoire à court terme, un trouble de la dénomination rapide ou une combinaison de plusieurs de ces troubles. Seul un petit nombre des sujets dyslexiques testés avaient un trouble associé du système visuel magnocellulaire ou des problèmes cérébelleux. En revanche, le trouble phonologique est assez souvent associé à des difficultés de traitement des indices acoustiques des sons de la parole.

### **3.2.5 Les origines neuro-biologiques**

Suite aux travaux de Déjerine sur les sujets alexiques, Hinshelwood (1917) a proposé que la dyslexie pouvait avoir une origine neurologique et que les difficultés de lecture et d'écriture de ses jeunes patients pouvaient être dues à un développement anormal de la même région pariétale qui était endommagée chez les patients alexiques. Une cinquantaine d'années plus tard, des études post-mortem ont permis de confirmer cette origine neurologique par l'observation d'ectopies (îlots de corps cellulaires) corticales (Geschwind et coll. 1979) et de microgyri (Evrard et coll. 1989), principalement dans les régions périssylviennes de l'hémisphère gauche et

plus précisément dans le planum temporale (Galaburda et coll. 1985). Un autre type de malformation a aussi été référencé : l'existence de dysplasies focales organisées en grands neurones anarchiquement dispersés depuis la matière blanche sous-jacente jusqu'au cortex cérébral. Les symptômes dyslexiques dans leur diversité pourraient dépendre de la localisation des anomalies micro-structurales qui pourraient venir perturber l'une ou l'autre des zones essentielles pour le transfert optimal de l'information à travers les réseaux sous-tendant les fonctions du langage. Ces anomalies pourraient concerner, chez l'enfant, les réseaux de la lecture en voie de mise en place, nuisant à l'automatisation du transcodage des informations visuelles vers les régions codant pour la phonologie et réciproquement. Toutefois, ces études sont limitées par la taille des effectifs, l'hétérogénéité phénotypique, la présence de comorbidités et les analyses a priori restreintes à des régions d'intérêts. Ce problème est pallié en partie par l'avènement de l'imagerie cérébrale qui a permis certaines avancées. Ainsi, une méthode d'analyse statistique de la densité du signal IRM dans le volume cérébral (technique Voxel-Based Morphometry ou VBM) a suggéré des particularités du signal de la substance grise dans le cortex temporal, notamment dans l'hémisphère gauche. L'interprétation de ces résultats reste délicate quand ils ne peuvent être appuyés par une analyse focalisée dans une région montrant des anomalies fonctionnelles chez les mêmes sujets ou par l'établissement de corrélations entre données VBM et données comportementales (Silani et coll. 2005). Par ailleurs, l'analyse de l'anisotropie du signal en imagerie de tenseur de diffusion a permis de mettre en évidence une diminution du score d'anisotropie au niveau de fibres de la substance blanche sous-jacentes à la jonction temporo-pariétale gauche, zone essentielle pour la médiation phonologique de la lecture. De plus, ces anomalies étaient souvent corrélées avec le score de lecture : une plus grande anisotropie, pouvant refléter une moins bonne organisation anatomique au sein des faisceaux de fibres nerveuses concernés, tendant à être associée à de moins bonnes capacités de lecture (Klingberg et coll. 2000, Beaulieu et coll. 2005, Deutsch et coll. 2005).

Plusieurs études ont montré que les patients dyslexiques souffrent aussi d'un trouble du transfert d'informations sensorielles et motrices entre les hémisphères, impliquant le corps calleux (Gross-Glenn et Rothenberg 1984, Moore et coll. 1995). Ce dernier est la principale commissure interhémisphérique par laquelle la majorité des informations est transmise d'un hémisphère à l'autre du cerveau. Le corps calleux aurait une taille significativement plus importante chez les dyslexiques (Robichon et Habib 1998). Les implications de cette variation de taille du corps calleux

restent mal connues. De plus, une étude (von Plessen et coll. 2002) sur 22 hommes dyslexiques a montré, à l'inverse, un corps calleux moins développé chez 78% de leurs dyslexiques, avec une réduction de la partie médiane postérieure de la région de l'isthme. Cette région contient des fibres nerveuses inter-hémisphériques provenant des aires corticales auditives primaires et secondaires. Les auteurs n'observent toutefois pas d'autres différences dans les autres parties du corps calleux. Ce résultat appuie l'hypothèse d'un déficit de traitement auditif chez les dyslexiques.

D'autres régions du cerveau ont, elles, été identifiées comme présentant des activations différentes chez les dyslexiques. Une réduction de l'activation de la partie postérieure du cortex temporal inférieur ainsi que du cortex temporal moyen a été observée dans des tâches de lecture (Brunswick et coll. 1999, Paulesu et coll. 2001), de décision phonologique (Rumsey et coll. 1997, Shaywitz et coll. 2003) et de décision sémantique (Shaywitz et coll. 2003). L'activation de ces régions est corrélée, chez l'enfant, à son niveau de lecture. Dans leur étude en MEG, Salmelin et coll. (1996) observent, en lecture de mots et de pseudomots, un déficit d'activation chez les dyslexiques dans la région temporo-occipitale inférieure gauche, 180 ms après présentation du stimulus. Ils ont interprété ce résultat comme une incapacité à traiter la forme globale des mots à un niveau pré-lexical, ou à extraire l'information phonologique immédiate. En comparant trois langues (le français, l'italien et l'anglais), Paulesu et coll. (2001) ont montré que quelque soit le degré d'opacité de la langue, les dyslexiques présentent un déficit d'activation du gyrus fusiforme et de la partie moyenne du gyrus temporal inférieur dans l'hémisphère gauche.

Utilisant des tâches de rimes impliquant la conscience phonologique et des épreuves de mémoire à court terme phonologique, Paulesu et coll. (1996) observent que les dyslexiques n'activent pas, contrairement aux normo-lecteurs, le cortex insulaire, région située entre l'aire de Broca et le cortex pariétal inférieur, régions qui sont quant à elles activées dans les tâches de rimes et de mémoire respectivement. La dyslexie a dès lors été envisagée comme une déconnexion entre les régions antérieures et postérieures des aires du langage. Des données vont dans le sens de cette hypothèse de déconnexion avec un déficit de co-activation de certaines aires dont le gyrus angulaire (Horwitz et coll. 1998). Cette structure est également moins activée chez les dyslexiques dans des tâches de décision sémantique (Shaywitz et coll. 2003) et de jugement de rimes sur des lettres (Temple et coll. 2001). Son niveau d'activation est corrélé avec le niveau de lecture chez l'enfant (Rumsey et coll. 1999). De plus, le gyrus supra-marginal gauche (BA40), considéré comme le siège de la mémoire phonologique, aurait également un fonctionnement déficitaire

chez les dyslexiques (Démonet et coll. 1992, Paulesu et coll. 1993). Au niveau du cortex frontal inférieur gauche, les modulations d'activations diffèrent en fonction des tâches et des études. Une augmentation de son activité est observée chez des adultes dyslexiques dans des tâches de lecture explicite mais pas quand la lecture est implicite comme en détection de lettres (Brunswick et coll. 1999, Shaywitz et coll. 1998). Son activation est positivement corrélée au niveau de lecture. Dans leur étude en MEG, Salmelin et coll. (1996) observent une hyperactivation chez les dyslexiques de l'aire frontale inférieure gauche, 400 ms après le début de la stimulation. Dans une tâche de perception de sons de parole, un réseau impliquant le cortex frontal inférieur et le gyrus supramarginal est activé avec une augmentation de l'activation dans l'aire de Broca chez les dyslexiques (Ruff et coll. 2002). Ces résultats pourraient mettre en évidence un réseau compensatoire au niveau du cortex frontal inférieur quand l'activité du gyrus temporo-occipital ou du gyrus supramarginal est déficitaire, avec une mobilisation plus importante des ressources phonologiques chez ces sujets. Cependant, Démonet et coll. (2004) rapportent une activité moins importante de cette région chez des participants dyslexiques. Une activation du cortex frontal inférieur droit plus élevée chez les dyslexiques non compensés a également été observée dans une tâche de décision phonologique (Shaywitz et coll. 2003). Cette région n'étant pas activée chez les mêmes sujets en lecture à haute voix, les auteurs interprètent leurs résultats comme associés à la mémoire de travail et à la charge impliquée par la recherche en mémoire.

Pour évaluer la théorie phonologique, plusieurs études d'imagerie fonctionnelle ont utilisé des tâches de rimes, de mémoire de travail verbale et de l'écoute passive de stimuli verbaux. La plupart de ces études ont montré un hypofonctionnement des régions périsylviennes plutôt gauches. En perception catégorielle de phonèmes, les sujets dyslexiques présentent une diminution de l'activité dans le gyrus supra-marginal gauche (Ruff et coll. 2002), une région clé dans les processus phonologiques (Démonet et coll. 1996).

En ce qui concerne l'hypothèse magnocellulaire, des arguments concordants pour un dysfonctionnement du système visuel magnocellulaire ont été rapportés. Ainsi, Eden et coll. (1996) ont retrouvé un défaut d'activation de l'aire MT/V5 durant une tâche de détection de mouvement et une corrélation entre le niveau d'activation de cette aire et la vitesse de lecture chez les dyslexiques. Toutefois, d'autres études n'ayant pas confirmé ces résultats (Johannes et coll. 1996, Amitay et coll. 2002), il semble que les effets du système magnocellulaire soient mis en évidence uniquement sous certaines contraintes expérimentales (Bednarek et Grabowska 2002).

D'autres données plaident en faveur de l'hypothèse cérébelleuse avec une hypo-activation du cervelet (Nicolson et coll. 2001), des anomalies du lobe antérieur de l'hémisphère droit du cervelet relié aux aires motrices frontales et à l'aire de Broca étant observées chez des sujets dyslexiques (Eckert et coll. 2003). Une activité moindre dans le cervelet droit a également été relevée chez des dyslexiques en réponse à des changements acoustiques rapides (Temple et coll. 2000). Zeffiro et Eden (2001) proposent que le trouble cérébelleux ne serait pas spécifique mais serait l'effet indirect d'un trouble cortical, effet lié aux connexions étroites entre cortex et cervelet.

Dans leur étude en IRMf, Temple et coll. (2000) ont mis en évidence, chez des sujets normo-lecteurs, que la réponse cérébrale à des variations rapides de la trace acoustique du signal de parole augmente au niveau de la région frontale inférieure gauche et de l'hémisphère cérébelleux droit lors de variations rapides comparativement à des changements plus lents du signal acoustique. Chez les sujets dyslexiques, les auteurs notaient une augmentation de l'activation dans ces mêmes régions pour des variations lentes. En utilisant des syllabes naturelles (ma/na), modifiées ou non par un étirement des transitions formantiques, Ruff et coll. (2002) ont indentifié la région frontale gauche comme sensible aux changements acoustiques. En effet, le ralentissement de la parole entraînait une augmentation d'activation dans cette région pour les sujets dyslexiques. Mais le niveau d'activation de la région du gyrus supra-marginal gauche n'était pas influencé par ces variations de signal acoustique, alors que cette région est habituellement le siège d'un défaut d'activation chez les adultes dyslexiques. Les auteurs constatèrent que l'activité neuronale était augmentée par le ralentissement de la parole dans certaines régions cérébrales et interprétèrent le défaut d'activité neuronale dans l'aire du gyrus supra-marginal comme le support du déficit phonologique dans la dyslexie.

### 3.2.6 Les origines génétiques

Nous venons de voir que le cerveau du dyslexique présente des anomalies corticales et ne s'active pas exactement comme le cerveau normo-lecteur. Toutefois, il reste à comprendre d'où proviennent ces anomalies. C'est en réponse à cette question que nous abordons maintenant le rôle de la génétique dans l'explication de la dyslexie. L'hypothèse selon laquelle des facteurs génétiques pourraient augmenter la susceptibilité à la dyslexie développementale est déjà fort ancienne (Stephenson 1907, Hallgren 1950) et un faisceau de présomptions en faveur de cette hypothèse

a été rassemblé depuis une vingtaine d'années (DeFries et coll. 1987). Le premier indice ayant permis d'envisager l'origine des troubles est la composante familiale : l'augmentation du risque chez les apparentés d'un sujet atteint. En effet, si un enfant est dyslexique, il existe de fortes chances qu'un de ses frères ou soeurs et l'un de ses deux parents le soient également. Bien entendu, l'agrégation familiale n'est qu'un élément suggestif et ne prouve pas l'origine génétique. En effet, les familles partagent une partie de leurs caractéristiques génétiques, mais également un certain environnement. Les études de jumeaux sont dès lors plus intéressantes car elles permettent d'apprécier le poids des facteurs génétiques par rapport aux facteurs environnementaux par le calcul de l'héritabilité. DeFries et coll. (1987) ont montré que si un jumeau monozygote est dyslexique, le second a 68% de risques de l'être aussi, alors que dans le cas de jumeaux hétérozygotes, cette probabilité n'est que de 38%. Cette différence de concordance est principalement attribuable à la différence de similarité génétique entre jumeaux mono- et dizygotes. Ces résultats permettent ainsi d'établir que l'héritabilité de la dyslexie est de l'ordre de 50-60 % établissant ainsi une contribution génétique à la dyslexie. Ces chiffres soulignent qu'il existe effectivement une origine génétique mais que celle-ci n'est pas unique (l'héritabilité n'est pas de 100%) et que d'autres facteurs entrent en compte. De même, l'observation de cas sporadiques peut être due à ces mêmes variations génétiques survenant de novo mais également à des dysfonctionnements cérébraux et cognitifs similaires aux origines diverses, génétique ou pas. La compréhension de l'origine de la dyslexie nécessite donc une modélisation des facteurs causaux à plusieurs niveaux : comportemental, cognitif, cérébral, génétique et environnemental (Ramus 2008)(cf figure 3.2).

Pour la dyslexie, on peut donc considérer à la fois le phénotype comportemental (le trouble de lecture), le phénotype cognitif (le déficit cognitif sous-jacent) et le phénotype cérébral (les caractéristiques cérébrales sous-jacentes au phénotype cognitif).

Les résultats des études familiales, bien qu'informatifs quant au caractère génétique de la dyslexie, n'expliquent en rien la nature de cette contribution génétique. Ce n'est que depuis l'achèvement du séquençage du génome humain que l'on dispose enfin de données directes sur la nature de ces facteurs génétiques, et les mécanismes par lesquels ils peuvent influencer le développement de la dyslexie (Lander et coll. 2001, Consortium 2004). Les études de génétique moléculaire, recoupant analyses génétiques et résultats de tests psychologiques, ont permis d'identifier



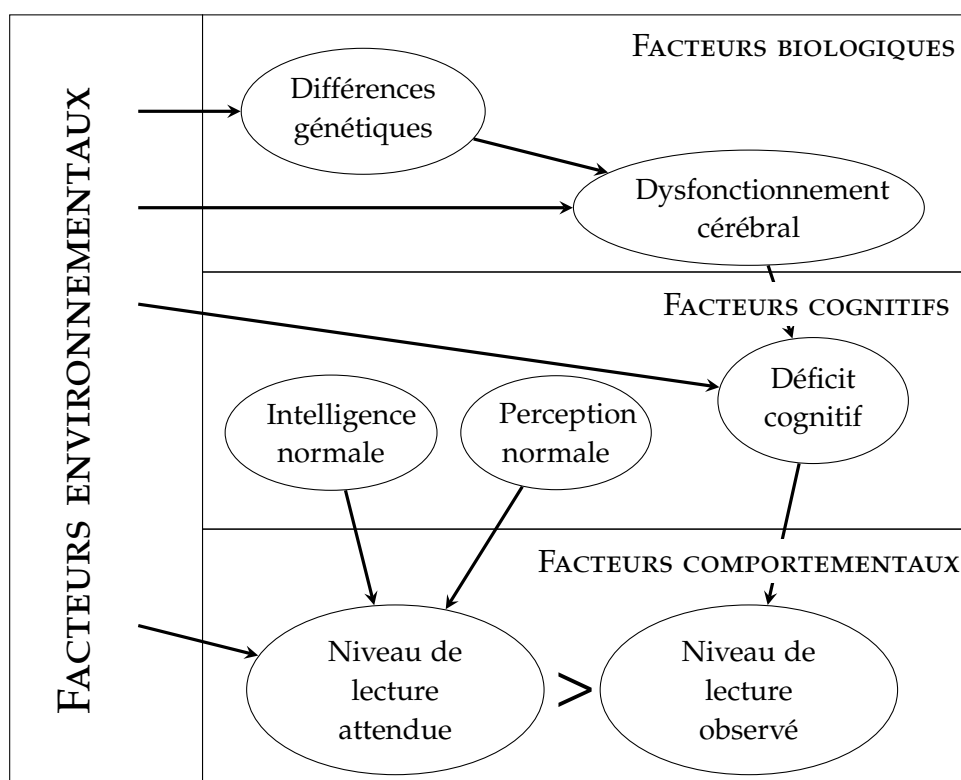


FIGURE 3.2 – Modélisation des facteurs causaux de la dyslexie

au moins six grandes régions du génome humain significativement liées à la dyslexie sur les chromosomes 1, 2, 3, 6, 15 et 18 (Fisher et DeFries 2002, Grigorenko 2003, Williams et O'Donovan 2006). Les recherches sur de grandes familles avec plusieurs membres atteints permettent d'affiner la localisation des sites impliqués. Ainsi, en 2003, une équipe finlandaise a identifié un premier gène associé à la dyslexie (le gène *DYX1C1*) sur la région q21 du chromosome 15 (Taipale et coll. 2003). Des neurobiologistes américains ont étudié la fonction de ce gène et ont démontré son implication dans la migration neuronale (Wang et coll. 2006). Depuis l'identification de ce gène, les découvertes se sont accélérées et cinq autres gènes de susceptibilité ont été associés à la dyslexie dont trois ont été plus longuement étudiés, deux sur le chromosome 6 (*KIAA0319* et *DCDC2*) et un sur le chromosome 3 (*ROBO1*). Les deux premiers (*DCDC2* et *KIAA0319*) sont, comme *DYX1C1*, impliqués dans la migration radiaire des neurones vers le cortex (Burbridge et coll. 2008, Meng et coll. 2005, Paracchini et coll. 2006) tandis que l'autre (*ROBO1*) est impliqué dans la migration axonale et dendritique (Andrews et coll. 2006, López-Bendito et coll. 2007), ainsi que dans la migration des inter-neurones (Andrews et coll. 2008).

Le fait que les 4 premiers gènes identifiés dans la dyslexie soient impliqués dans la migration neuronale suggère qu'il y a véritablement un lien non fortuit entre trouble de la migration neuronale et dyslexie. Les données génétiques appuient donc, vingt ans plus tard, l'hypothèse de Galaburda et coll. (1985). Cela permet donc d'établir un lien entre toutes les données disponibles, et autorise Ramus (2008) à formuler la synthèse suivante. Certains allèles de certains gènes (DYX1C1, KIAA0319, DCDC2, ROBO1, et d'autres restant à découvrir) augmentent la susceptibilité à des perturbations de la migration neuronale, engendrant (ou pas, selon les cas) des ectopies, des microgyries, et surtout affectant localement la structuration laminaire du cortex. Par des mécanismes qui ne sont pour l'instant pas compris, ces perturbations tendent, chez certains individus, à s'accumuler dans les régions péri-sylviennes gauches, qui sont notamment impliquées dans le traitement des sons de la parole (la phonologie), et qui sont utilisées lors de l'apprentissage de la lecture. La perturbation de l'organisation de ces aires, qui se reflète également de manière plus macroscopique en imagerie cérébrale par une quantité de matière grise réduite et une plus faible anisotropie de la matière blanche sous-jacente, engendre un déficit subtil des capacités phonologiques, qui se révèle particulièrement lors de l'apprentissage du langage écrit, qui recrute intensivement ces capacités (Ramus 2004).

Avant de poursuivre, il nous semble indispensable de préciser que bien que l'usage en génétique veuille qu'on désigne ces gènes comme des « gènes de la dyslexie », il s'agit d'un abus de langage, d'un raccourci pour désigner des « gènes dont certains allèles augmentent le risque de dyslexie ». Il va de soi qu'aucun de ces gènes n'est spécifique à la dyslexie et qu'ils ne sont pas des gènes de la lecture ou du langage oral. Comme presque tous nos gènes, ceux-ci existent dans des formes voisines chez les autres mammifères, voire même chez la drosophile (ROBO1). Ces gènes exercent, chez tous ces animaux, des fonctions multiples, et sont d'ailleurs exprimés dans de nombreux organes différents au cours du développement et de la vie. Ce qui les relie plus spécifiquement à la dyslexie, c'est le fait d'être aussi impliqués dans un stade particulier du développement cérébral, et notamment dans la mise en place de certaines aires cérébrales impliquées dans la phonologie et qui seront bien plus tard recrutées par l'apprentissage de la lecture (Ramus 2004). Enfin, il est extrêmement important d'insister sur le fait que les facteurs génétiques ne déterminent pas seuls l'individu mais qu'ils interagissent avec tous les facteurs non-génétiques (biochimiques, traumatiques, familiaux, pédagogiques, sociaux). Dans la mesure où l'on ne peut actuellement intervenir sur les facteurs génétiques, c'est

sur les facteurs non-génétiques qu'il faudra compter pour améliorer le développement de l'enfant.

La dyslexie de développement a souvent été étudiée en tant que modèle de pathologie de la lecture. Cependant, ce n'est pas la seule pathologie dans laquelle on retrouve des difficultés de lecture. La partie suivante sera consacrée à une maladie génétique dans laquelle des troubles d'apprentissage sont constatés pour la moitié des patients : la neurofibromatose de type 1.

### 3.3 LA NEUROFIBROMATOSE DE TYPE I (NF1)

La Neurofibromatose de Type 1 (appelée aussi maladie de Recklinghausen) est une pathologie multi-facettes caractérisée à la fois par des manifestations physiques et cognitives, bien que seuls les symptômes physiques soient actuellement pris en compte pour établir le diagnostic.

Le travail réalisé durant mes années de thèse a surtout concerné le profil cognitif des enfants atteints de cette maladie et aux troubles de lecture fréquemment rencontrés. Dans cette section, nous reprendrons les grandes lignes de la revue de littérature sur le sujet réalisée par Hachon et coll. (2010).

Toutefois, il semble indispensable, avant d'aborder ces aspects, de définir la NF1 et de présenter ses critères diagnostiques.

#### 3.3.1 Définition

La NF1 est une maladie neurocutanée génétique à transmission autosomique dominante dont la prévalence est estimée à 1/3500 Kayl et Moore (2000). Le gène responsable est un gène suppresseur de tumeur localisé sur le bras long du chromosome 17 (17 q 11.2). La fonction précise de la protéine qu'il code, la neurofibromine reste mal-connue mais il est supposé qu'elle stimule et participe à la régulation de la croissance et de la différenciation de cellules embryonnaires et fœtales de types variés, et notamment à celle des neurones du système nerveux central (Nordlund et coll. 1995) Elle jouerait un rôle important dans la transduction cellulaire impliquée dans la plasticité synaptique, la mémoire et les apprentissages. La fréquence des mutations spontanées ou de novo est particulièrement élevée avec près de la moitié de cas sporadiques.

Le diagnostic de la NF1, possible dès les premières années de vie, est basé sur des

critères cliniques établis en 1988 lors de la conférence de consensus du « National Institutes of Health » de Bethesda (USA). Les sept critères cardinaux suivants ont été définis et le diagnostic de NF1 peut être posé si deux de ces signes sont réunis chez un même individu.

- Au moins 6 tâches café au lait. Ces tâches sont l'une des particularités les plus communes et consistent en de petites plaques plus pigmentées que la peau environnante, dont le diamètre dépasse 0,5 cm avant la puberté, et 1,5 cm au-delà. Leur nombre varie de quelques unes à plusieurs milliers. Elles peuvent être présentes dès la naissance mais apparaissent généralement entre 0 et 2 ans.
- La présence de lentigines axillaires ou inguinales. Tâches café au lait de petite taille, au niveau des aisselles ou de l'aîne.
- Au moins 2 neurofibromes, ou 1 neurofibrome plexiforme. Tumeurs nerveuses (le long des nerfs périphériques ou spinaux), généralement bénignes, proliférant à la surface de la peau (neurofibrome cutané), sous sa surface ou dans des zones plus profondes (neurofibrome plexiforme). Leur nombre varie de quelques uns à plusieurs milliers. Les neurofibromes cutanés apparaissent généralement à la pré-adolescence mais restent bénins. Les neurofibromes plexiformes, souvent présents dès la naissance, se caractérisent par des tumeurs infiltrantes pouvant entraîner une croissance anormale des os et devenir malignes.
- Un gliome du nerf optique Tumeur bénigne des nerfs optiques et/ou du chiasma, se retrouvant dans environ 20% des cas avant 6 ans. Elle est susceptible de perturber l'acuité visuelle et tend à régresser avec l'âge.
- Au moins 2 nodules de Lisch de type hamartome irien. L'hamartome (petite lésion molasse sans signe associé) irien est une petite tumeur de l'iris qui n'affecte pas la vision et dont la présence est pathognomonique de la maladie. Leur fréquence augmente avec l'âge : moins de 30% des enfants de moins de 6 ans sont concernés contre 90% environ des adultes.
- Une lésion osseuse caractéristique. Plusieurs types de lésions possibles : pseudarthrose (absence de consolidation de 2 fragments osseux), dysplasie (malformation ou déformation résultant d'une anomalie du développement d'un tissu ou d'un organe qui survient après la naissance) du sphénoïde, amincissement du cortex des os longs. Elles touchent préférentiellement les vertèbres, existent à la naissance et se manifestent par une déformation de l'os pendant la croissance.

- Un apparenté du 1<sup>er</sup> degré atteint (parent, fratrie ou enfant).

Chez l'adulte, le diagnostic est généralement facile à poser sur la base de l'examen clinique tandis que chez l'enfant, les tâches café au lait peuvent demeurer pendant longtemps le seul symptôme physique manifeste de la maladie. Dans ce cas et en l'absence d'antécédents familiaux, le diagnostic peut être suspendu. La symptomatologie de la NF1 évolue avec le temps pour être généralement quasi-complète à l'âge de 5 ans.

### 3.3.2 Les difficultés d'apprentissage

Les troubles des apprentissages constituent la complication la plus fréquente chez les enfants atteints de NF1. Leur prévalence est évaluée entre 30 et 60% dépendant des études (Ozonoff 1999, North 2000, Hyman et coll. 2005) . Un ratio de près de 50% est confirmé par les études les plus récentes.

#### 3.3.2.1 Le quotient intellectuel

Quand on aborde l'angle des difficultés d'apprentissage, l'un des premiers aspects à prendre en compte est le Quotient Intellectuel. Chez les enfants NF1, il est aujourd'hui admis que bien que le pourcentage (6 à 7 % d'après Hyman et coll. (2005) de retard intellectuel global (QI total < 70 aux échelles de Wechsler) soit plus important que dans la population générale, il ne peut expliquer à lui-seul les troubles scolaires. Cependant, toutes les données convergent pour montrer un glissement de la courbe de distribution normale vers la gauche avec un niveau intellectuel moyen des enfants NF1 inférieur (autour de 90 dans les études récente (Hyman et coll. 2005; 2006, Billingsley et coll. 2003, Clements-Stephens et coll. 2008), à celui des enfants sains. Par ailleurs, alors que certaines études ont montré une dissociation entre les épreuves verbales et non-verbales au profit des premières (Billingsley et coll. 2003, Hofman et coll. 1994, Cutting et coll. 2000), d'autres ont souligné la dissociation inverse (Eliason 1986; 1988) et des études plus récentes n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les différents indices (Hyman et coll. 2005; 2006, Descheemaeker et coll. 2005).

### 3.3.2.2 Les traitements visuo-spatiaux

L'hypothèse selon laquelle les perturbations visuo-spatiales sont au centre du profil cognitif des enfants NF1 reste très répandue. Le test le plus sensible ayant permis de mettre en évidence ce déficit visuo-spatial est le test d'orientation de ligne de Benton (Judgement Line orientation : JLo) (Ozonoff 1999, North 2000, Levine et coll. 2006) avec 80% des études ayant démontré sa sensibilité. Une analyse discriminante a ainsi permis de montrer que ce test permettait à lui-seul de classer correctement 92% des enfants NF1 (Schrimsher et coll. 2003). Bien que le JLo fasse intervenir d'autres habiletés telles que la mémoire de travail, les compétences motrices et attentionnelles, des auteurs ont souligné que le trouble visuo-spatial persistait même après contrôle de ces composantes (Schrimsher et coll. 2003, Hyman et coll. 2005).

### 3.3.2.3 La motricité

De nombreuses études se sont intéressées aux difficultés motrices dans la NF1 et ont mis en évidence des résultats inférieurs à la norme chez 20 à 30% des patients dans des épreuves de coordination visuo-motrice, d'équilibre et de motricité fine.

### 3.3.2.4 Le langage oral

Des troubles du langage oral ont également été retrouvés dans la population NF1 affectant les versants expressif et réceptif (Hofman et coll. 1994, Mazzocco 2001, Joy et coll. 1995, Dilts et coll. 1996) mais ces déficits semblent estompés quand le QI est contrôlé (Hyman et coll. 2005).

En revanche, Denckla (1996) a constaté des déficits en segmentation de phonèmes et en mémoire phonologique similaires à ceux des enfants dyslexiques. La même équipe a trouvé des performances analogues entre dyslexiques et NF1 en conscience phonologique et en lecture (Cutting et coll. 2000) mais des divergences entre ces 2 groupes en langage oral et au JLo qui étaient déficitaires dans la NF1. Les enfants souffrant de cette pathologie semblent donc présenter des perturbations au niveau de la phonologie tant en conscience phonologique qu'en mémoire à court-terme phonologique.

En ce qui concerne la syntaxe, les données divergent avec un déficit mis en évi-

dence par certains auteurs (Eldridge et coll. 1989) alors que d'autres ne le retrouvent pas (Mazzocco 2001).

### 3.3.2.5 Le langage écrit

Comme nous l'avons signalé précédemment, les compétences métaphonologiques sont fortement reliées aux habiletés de lecture. Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté des études soulignant des perturbations phonologiques chez les enfants NF1. Les auteurs ayant étudié la lecture chez ces patients ont mis en évidence des résultats sous la norme chez certains enfants à la fois en fluence et en compréhension de texte.

Récemment, Watt et coll. (2008) ont examiné les mécanismes de lecture de 30 enfants NF1 selon le modèle à double voie de Coltheart (1978). Ils ont mis en évidence que 75% des enfants déficitaires en lecture présentaient un profil de dyslexie phonologique avec une atteinte principale de la voie sub-lexicale. Les 25% d'enfants restants étaient quant à eux plutôt assimilés à des dyslexiques mixtes.

Au niveau de l'orthographe, certaines études retrouvent des déficits chez 30 à 40% des enfants NF1 (North et coll. 1994, Descheemaeker et coll. 2005, Hyman et coll. 2005) tandis que d'autres n'observent pas de déficit à ce niveau (Mazzocco 2001, Eldridge et coll. 1989).

### 3.3.2.6 Mathématiques

Des difficultés de calcul mental et de résolution de problèmes ont été observées chez des patients NF1 mais ce trouble ne semble pas spécifique puisqu'il ne persiste pas après contrôle du QI ou des problèmes de langage écrit (Descheemaeker et coll. 2005, Mazzocco 2001).

### 3.3.2.7 L'attention

Plusieurs études ont également montré que les troubles d'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H) sont plus fréquents chez les enfants atteints de NF1 que dans la population générale. Ainsi, 35 à 50 % des patients NF1 rencontreraient les critères diagnostiques du TDA/H (North et coll. 2002).

Tous ces résultats mettent en évidence l'existence de difficultés d'apprentissage

chez une partie des enfants NF1. Cependant, de nombreuses questions restent en suspens concernant le profil cognitif de ces enfants. Cette pathologie comporte un intérêt particulier pour la compréhension des mécanismes de lecture et leurs altérations avec des difficultés similaires aux dyslexiques pour certains points mais des divergences sur d'autres.

### 3.4 SYNTHÈSE

La lecture est une activité cognitive complexe qui nécessite un apprentissage explicite pour s'automatiser. L'acquisition de la lecture se fait en plusieurs étapes qui se chevauchent. Nous avons consacré la première partie de ce chapitre à expliquer la manière dont ces stades se mettent en place. Nous savons par ailleurs que pour certains enfants, l'apprentissage de la lecture pose d'importantes difficultés et ce malgré un apprentissage explicite et dans le cadre d'une intelligence normale. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons abordé ce trouble spécifique de la lecture : la dyslexie. Après avoir défini ce trouble, nous avons présenté de nombreuses études sur les hypothèses explicatives de ce trouble. Nous avons également évoqué le fonctionnement cérébral des dyslexiques et l'origine génétique de leur trouble.

Une autre pathologie dans laquelle des difficultés de lecture sont rencontrées, la neurofibromatose de type 1, a été présentée dans la dernière section.

Le chapitre suivant aura pour objectif de spécifier le cadre dans lequel s'insère notre travail. Nous présenterons les études plus directement liées à notre thématique. Nous évoquerons ainsi les effets de supériorité du mot et la position optimale du regard chez les enfants dyslexiques et normo-lecteurs. Afin d'étudier ces effets, nous utiliserons la technique des potentiels évoqués.



# **Deuxième partie**

## **Données expérimentales**



## PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

# 4

Aujourd'hui, la plupart des auteurs s'accorde sur le fait que la reconnaissance de mots, d'objets ou autres n'est pas exclusivement sérielle mais tient compte de nombreux effets interactifs (Bullier 2001, Humphreys et coll. 1997). Ainsi, le traitement à un niveau supérieur peut débiter avant que celui des niveaux précédents d'analyse ne soit complété. De plus, tout au long de l'analyse, des retours d'informations se font des derniers aux premiers niveaux de traitement. Ces différentes phases de traitement sont influencées par des effets indépendants du stimulus dits effets « Top-down ». En modalité visuelle, ces effets peuvent être de deux types : lexicaux et attentionnels. La démonstration la plus évidente de l'existence d'effets « top-down » lexicaux au cours du traitement d'une séquence de lettres est l'« Effet de Supériorité du Mot » ou « Word Superiority Effect » (WSE) présenté dans la section 2.3.6.

Le fait qu'une lettre soit plus facilement reconnue si elle est contenue dans un mot que dans un non-mot révèle que la connaissance antérieure d'un mot facilite la reconnaissance de ses lettres. Le WSE a été testé dans différentes études comportementales, révélant toujours le même effet de facilitation dans la précision et le temps de réponse des sujets (Grainger et Van Heuven 2003). Bien qu'on sache que la mémoire d'un mot influence l'identification ultérieure d'une de ses lettres, peu d'études se sont intéressées à savoir à quelle phase de traitement cet effet facilitateur prenait place.

Dans son étude en potentiels évoqués chez des adultes normo-lecteurs, Martin (2005) postulait qu'une meilleure performance dans l'identification de lettres dans

un mot versus un non-mot peut être expliquée par l'intervention de processus « top-down », dans le sens où l'information lexicale d'un mot en mémoire augmente le niveau d'activation de toutes les lettres de ce mot. Cette différence de performance entre les contextes lexicaux a été observée au niveau des résultats comportementaux et sur les tracés de PE approximativement 200 ms après présentation du stimulus, au niveau du pic N<sub>1</sub>, dans les régions occipitales bilatérales. Elle associe cette onde à la N<sub>170</sub> (le délai de 30 ms étant attribué à l'apparition du masque), considérée comme reflétant le traitement pré-lexical d'une séquence de lettres et suggère que les représentations lexicales en mémoire influencent l'identification de lettres à un niveau pré-lexical. Différents auteurs ayant proposé que l'onde N<sub>1</sub> reflète une activité neuronale dans le cortex extra-strié (Kuriki et coll. 1998, Proverbio et Zani 2003), Martin suggère que les effets « top-down » lexicaux influencent l'activité neuronale dans ces aires extra-striées.

Notre travail s'inscrit dans la lignée de celui de Martin (2005) puisque nous avons étudié cet effet de supériorité du mot chez des enfants dyslexiques et normo-lecteurs en utilisant également la méthode des potentiels évoqués. Comme elle, nous nous intéresserons aussi aux effets de position de la lettre dans un mot sur l'identification de celle-ci. Dans cette partie, nous présenterons les recherches sur les aspects développementaux de l'effet de supériorité du mot ainsi que celles sur la position du regard. Nous détaillerons ensuite les résultats obtenus par Martin (2005).

#### 4.1 L'EFFET DE SUPÉRIORITÉ DU MOT : DÉVELOPPEMENT NORMAL ET PATHOLOGIQUE

L'effet de supériorité du mot a d'abord été révélé chez le lecteur expert mais par la suite, plusieurs études se sont intéressées à son développement au cours de l'apprentissage de la lecture et à sa mise en place chez l'enfant normo-lecteur et dyslexique. En 1990, Chase et Tallal (1990) comparent les performances d'enfants dyslexiques avec celles d'enfants normo-lecteurs appariés en âge ou en niveau de lecture et celles d'adultes, dans une tâche d'identification de lettres. Ils utilisent le paradigme de choix forcé de Reicher-Wheeler sur des mots, des pseudomots et des non-mots. Leurs résultats montrent des effets du type de stimuli différents en fonction du groupe. Les auteurs observent, chez l'adulte, de moins bonnes performances pour les non-mots que pour les mots et les pseudomots qui ne diffèrent

pas entre eux. Les jeunes lecteurs présentent également un effet de supériorité du mot par rapport aux non-mots mais des scores intermédiaires pour les pseudo-mots. Les performances des enfants dyslexiques en revanche ne se distinguent pas en fonction des stimuli. Une simulation de ces données expérimentales avec le modèle à activation interactive (IAM) leur a permis de suggérer que les influences top-down lexicales augmentent avec l'âge et le niveau de lecture mais pourraient être absentes chez les jeunes dyslexiques.

Dans une étude ultérieure utilisant un paradigme similaire, Grainger et Van Heuven (2003) obtiennent des résultats divergents puisqu'ils observent que les enfants normo-lecteurs et dyslexiques identifient plus facilement une lettre dans un mot ou dans un pseudomot que dans un non-mot mais leurs performances sont similaires pour les 2 premières catégories de stimuli. Ils en déduisent que le contexte orthographique influence la reconnaissance de lettres dans une séquence mais que les propriétés lexicales n'interviennent pas. En revanche, chez les adultes, ils observent un effet de supériorité du mot comparé au pseudomot. Ils suggèrent que le WSE reflète des traitements top-down selon lesquels l'identification de lettres est déduite après reconnaissance du mot. Chez le lecteur expert adulte, deux mécanismes pourraient intervenir dans l'identification de lettre. L'un top-down lexical et l'autre bottom-up concerne le contexte orthographique.

Ces résultats divergents nous ont poussé à étudier la dynamique des effets top-down lexicaux chez des enfants normo-lecteurs et dyslexiques. Pour ce faire, nous avons utilisé le paradigme de choix forcé de Reicher-Wheeler et comparé le déroulement temporel des événements électrophysiologiques induits par l'identification d'une lettre dans un mot ou un non-mot.

## 4.2 L'EFFET DE POSITION DU REGARD

Un autre effet bien connu en lecture est l'effet de position optimale du regard : un mot est plus facilement identifié quand il est fixé légèrement à gauche de son centre. Théoriquement, il semble que toute l'information du mot est extraite en une seule fixation ce qui ne serait pas le cas pour les non-mots. Dans une tâche de décision lexicale, par exemple, l'OVP n'est observé que pour les mots. Pour les non-mots, il n'y a aucune différence en fonction de la position laissant supposer que leur rejet est basé sur la détection d'une violation locale de régularité orthographique. Cet effet de position optimale du regard spécifique aux mots a été étudié

chez les enfants en début d'acquisition de la lecture. Aghababian et Nazir (2000) n'observent pas d'effet du niveau scolaire sur l'OVP chez des enfants de primaire. L'OVP est mis en évidence dès la fin de la première année d'apprentissage de la lecture. Dans la lignée de cette étude, Ducrot et coll. (2003) confirment la présence de cet effet dès le début de la lecture mais observent ce même effet de position optimale du regard chez des enfants dyslexiques. Cependant, le profil n'est pas totalement similaire puisque contrairement aux normo-lecteurs, les dyslexiques ne présentent pas la courbe typique en J-inversé (meilleures performances quand les lettres initiales sont fixées plutôt que les lettres finales). Chez ces enfants, la courbe est symétrique et les auteurs interprètent cette absence d'asymétrie gauche-droite comme un déficit du traitement des informations périphériques. Rappelons cependant que cette asymétrie serait la conséquence de l'interaction de 3 facteurs : (1) les premières lettres des mots sont plus informatives que les dernières, (2) le regard tend à fixer préférentiellement le début des mots de sorte que les lecteurs sont plus habitués à traiter les mots vus à partir de cette localisation, (3) les éléments du champs visuel droit sont directement projetés dans l'hémisphère gauche, dominant dans le traitement du langage chez la plupart des gens or une fixation en début de mot engendre qu'un plus grand nombre d'éléments est présenté dans le champs visuel droit (Brysbaert et Nazir 2005).

### 4.3 LE MASQUAGE LATÉRAL

Quand on aborde l'identification de lettres dans une séquence, il faut tenir compte d'un autre effet pouvant moduler cette reconnaissance : le masquage latéral. Il a été montré que l'environnement de la lettre influence l'identification de celle-ci. En effet, une lettre isolée sera plus facilement reconnue que si elle est présentée au centre d'une séquence. De même, le masquage sera moindre pour les lettres aux extrémités de la séquence car elles ne sont masquées que d'un côté. Cet effet de masquage est moins contaminant pour les mots car ceux-ci bénéficient du contexte orthographique sur lequel le sujet peut s'appuyer pour identifier les lettres. Les effets de masquage et de contexte orthographique se combinant, il en résulte une reconnaissance de lettres plus facile quand elle est isolée (pas de masquage latéral) ou dans un mot (contexte orthographique) que quand elle est dans un non-mot ou au milieu d'autres signes graphiques.

## 4.4 LES EFFETS « TOP-DOWN » LEXICAUX SUR LA RECONNAISSANCE DE MOTS ISOLÉS

Dans une expérience d'identification de lettres utilisant le paradigme de Reicher-Wheeler en potentiels évoqués, Martin (2005) a étudié dans un premier temps à quel stade de traitement orthographique interviennent les effets « top-down » lexicaux. Le traitement orthographique peut se décomposer en 3 étapes allant de l'analyse des traits visuels du mot jusqu'au traitement du mot en passant par un traitement des lettres. Le schéma 4.1 montre ces différents traitements pour le mot « MON » et précise les régions activées à chaque niveau.

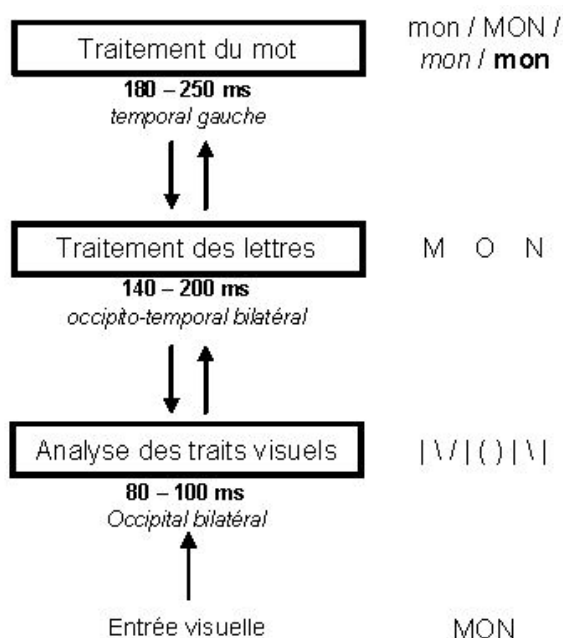


FIGURE 4.1 – Schéma des processus de traitement visuel du mot « MON »

Dans leur étude, les stimuli étaient des séquences de 5 lettres (mots ou non-mots) présentées durant 50 ou 66 ms. L'analyse comportementale sur les taux d'erreurs et les temps de réaction (TR) montre qu'une lettre est mieux et plus rapidement identifiée dans un mot que dans un non-mot. De plus, elle signale un effet du temps de présentation (TP) sur les taux d'erreurs (plus d'erreurs pour un TP de 50 ms) mais pas sur les temps de réaction. Aucune interaction n'est mise en évidence entre la lexicalité et les temps de présentation.

Au niveau des potentiels évoqués, l'auteur observe trois événements majeurs dans

les régions pariéto-occipitales ( $P_1$ ,  $P_1'$  et  $N_1$ ), un événement fronto-central ( $P_{300}$ ) et des divergences de tracés de potentiels entre les régions temporales gauche et droite en comparant les deux contextes lexicaux entre 240 et 300 ms. Alors que les événements  $P_1$  et  $P_1'$  (considéré comme l'équivalent de  $P_1$  induit par le masque) ne diffèrent pas entre les conditions mots et non-mots, les premières divergences sont observées dès l'onde  $N_1$ . Cette onde est plus tardive et moins ample à 66 ms de présentation et une interaction entre le temps de présentation et la lexicalité est constatée au niveau de l'amplitude. L'amplitude de  $N_1$  ne diffère entre les mots et les non-mots qu'à 66 ms de présentation. Martin (2005) assimile cette onde à la  $N_{170}$  qui est considérée comme reflétant le traitement pré-lexical d'une séquence de lettres. Elle suggère donc que les représentations lexicales en mémoire influencent l'identification de lettres à un niveau pré-lexical.

Par ailleurs, les résultats montrent une dérive négative entre [240 - 300] ms, dans la région temporale gauche, uniquement dans le contexte Mot. Cette onde négative pourrait refléter la phase lexicale du traitement d'une séquence de lettres, permettant de différencier les mots des non-mots. La différence hémisphérique a été attribuée à une implication préférentielle du gyrus fusiforme gauche à la reconnaissance des formes visuelles des mots (Cohen et coll. 2000, McCandliss et coll. 2003). Cet événement  $N_{Left}$  suggère qu'un traitement lexical est opéré par les sujets réalisant l'expérience, bien que la tâche soit d'identifier une lettre et non une séquence de lettres. Ce résultat implique que le traitement des mots est automatique, même si la tâche ne le nécessite pas explicitement.

Dans les régions fronto-centrales, une onde positive, la  $P_{300}$  diverge entre mots et non-mots au niveau de sa latence mais pas de son amplitude. La  $P_{300}$  plus précoce dans le contexte non-mot montre que ces stimuli sont catégorisés plus rapidement que les mots. Les non-mots étant des séquences illégales de lettres, ils sont plus aisément identifiables comme lexicalement non valides. Le fait que l'amplitude de la  $P_{300}$  ne diffère pas entre les 2 conditions reflèterait une charge attentionnelle équivalente.

#### 4.4.1 Effet de position du regard

Dans un second temps, Martin (2005) a observé les effets de position du regard et mis en évidence un effet significatif mais également une interaction entre lexicalité et position du regard sur le taux d'erreurs. Dans le contexte non-mots, les lettres extrêmes sont mieux identifiées que les lettres internes soulignant un effet



de masquage latéral. En revanche, pour les mots, les performances sont maximales en position 2 considérée comme la position optimale du regard.

En potentiels évoqués, des différences sont observées sur l'amplitude de la N1 avec des effets de lexicalité et de position significatifs ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs. L'amplitude moyenne de la N1 ne diverge pas entre mots et non-mots pour les lettres en positions 1 et 5 mais est plus importante pour les mots en troisième position. Cette même onde N1 n'étant pas plus ample en position 3 que pour les positions extrêmes, l'auteur propose que c'est plutôt l'effet de masquage latéral qui est amoindri par les effets « top-down » lexicaux.

D'autre part, dans cette étude, la P1 est retardée dans l'hémisphère droit pour l'identification de lettre en position 1 et dans l'hémisphère gauche pour la position 5. Dans ce paradigme expérimental, la lettre à identifier était toujours présentée sur le point de fixation, en position centrale. En position 1, la quasi-totalité de l'information visuelle était donc projetée dans l'hémichamp visuel droit, et donc transférée à l'hémisphère gauche. En revanche, en cinquième position, l'information est présentée à gauche et transmise à l'hémisphère droit. Les observations faites sur les PE suggèrent que l'information arrivant à l'hémisphère gauche (position 1) est transférée à l'hémisphère droit avec un certain délai et le phénomène inverse est observé lorsque l'information visuelle arrive à l'hémisphère droit. L'identification de lettres induit donc une P1 dans l'hémisphère contralatérale à l'hémichamp visuel stimulé, environ 100 ms après stimulation mais pas de P1 au niveau de l'hémisphère ipsilatérale, pour la même fenêtre temporelle. L'information visuelle provenant d'items présentés en vision fovéale n'est donc pas envoyée simultanément aux deux hémisphères cérébraux, quand ces items sont fixés à leurs extrémités. Ces résultats suggèrent aussi qu'une quantité minimale d'information visuelle est nécessaire pour induire un événement P1 dans le cortex visuel contralatéral. En deçà du seuil de 1,5 lettres présentes dans un hémichamp, aucune P1 n'est enregistrée dans l'hémisphère contralatérale. Finalement, la latence moyenne de P1 est significativement plus grande pour la position 1 que pour la position 5 : ce qui suggère une différence de temps de transfert interhémisphérique de l'hémisphère droit au gauche et inversement, confirmée par les calculs de temps de transfert. Le transfert a tendance à être plus rapide de l'hémisphère droit à l'hémisphère gauche (28 ms) que dans le sens inverse (40 ms), bien que ce résultat ne soit pas statistiquement significatif.

#### 4.4.2 Effets « top-down » lexicaux et dyslexie

Le même paradigme expérimental a été proposé à des adultes dyslexiques et leurs performances ont été comparées à celles des normo-lecteurs. L'analyse de variance sur les taux d'erreurs ne révèle aucun effet significatif de groupe mais un effet de lexicalité et une interaction groupe/lexicalité significatifs. Les taux d'erreurs sont significativement moins importants en contexte mots chez les sujets normo-lecteurs mais pas chez les dyslexiques. L'effet de lexicalité n'est donc pas observé chez ces derniers.

Au niveau électrophysiologique, les ondes P<sub>1</sub> et P<sub>300</sub> ne présentent aucune différence significative entre les deux groupes. En revanche, l'amplitude de la N<sub>1</sub> est moins ample pour les dyslexiques. De même, une interaction groupe/lexicalité significative est observée sur cette onde qui est plus ample en condition mot pour les normo-lecteurs mais qui ne diffère pas entre les deux conditions chez les dyslexiques. Chez l'adulte expert, une seconde onde négative était observée en condition mots dans l'hémisphère gauche uniquement. Ces effets de lexicalité et d'hémisphère ne sont pas mis en évidence chez les sujets dyslexiques.

### 4.5 PROBLÉMATIQUE

Dans ce travail, nous étudierons les effets « top-down » lexicaux chez des enfants normo-lecteurs et dyslexiques. Nous chercherons à évaluer si ces effets sont liés au niveau de lecture et/ou à l'âge des sujets. Nous analyserons également le rôle du masquage latéral et l'influence des temps de présentation dans ces tâches d'identification de lettres. Grâce aux potentiels évoqués, nous tenterons de voir à quelles étapes du traitement orthographique les influences interviennent. Nous étudierons également le transfert interhémisphérique des informations visuelles en fonction du champ visuel.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 5.1 LES POTENTIELS ÉVOQUÉS

#### 5.1.1 Enregistrement des potentiels évoqués

Les potentiels évoqués sont enregistrés à l'aide d'électrodes placées à la surface du scalp et reliées à des amplificateurs. Ces derniers enregistrent les différences de potentiels entre une électrode donnée et une électrode dite de référence. Un ordinateur permet un enregistrement continu de ces différences de potentiels.

##### 5.1.1.1 Les électrodes

Le système d'enregistrement utilisé pour cette étude se compose de 32 électrodes métalliques circulaires et creuses fixées dans un bonnet posé sur la tête du sujet. Afin de faciliter le contact entre le scalp et les électrodes, et donc améliorer l'enregistrement du signal, le scalp est décapé à l'alcool au niveau de chaque électrode. Ensuite, chaque trou au centre des électrodes est rempli d'un gel conducteur et abrasif (mélange à haute teneur en sels alcalins  $K^+$ ,  $Na^+$  et  $Cl^-$ ). Les électrodes sont réparties sur le bonnet de façon standardisée, selon le modèle « 10-20 international » : 19 électrodes sont placées à des distances fixes de certains repères osseux (nasion, inion et les repères préauriculaires droit et gauche) (voir figure 5.1), puis les autres électrodes sont interposées entre celles-ci jusqu'à atteindre le total de 32

électrodes (Figure 5.2).

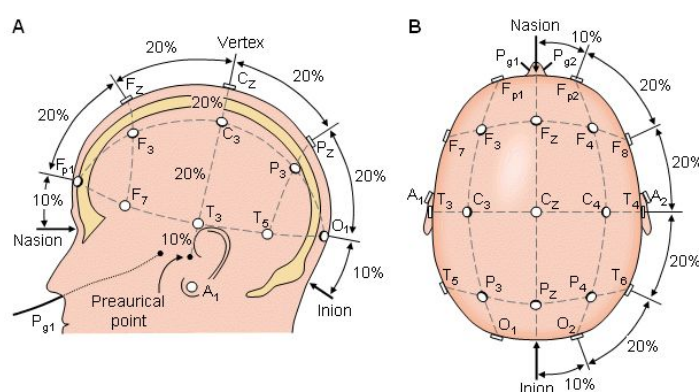


FIGURE 5.1 – Répartition des 19 électrodes standards selon le système « 10-20 international »

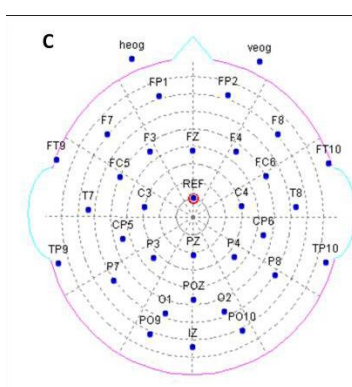


FIGURE 5.2 – Répartition des électrodes (vues du haut) sur un bonnet à 32 voies

Après la pose du bonnet, le gel est appliqué et les impédances des électrodes sont contrôlées afin d'obtenir des valeurs homogènes et inférieures à 20 k $\Omega$ . Les clignements oculaires des sujets seront enregistrés durant toute l'expérience grâce à deux électrodes supra- et infra-orbitales pour permettre une correction des artefacts oculaires au cours des traitements préliminaires du signal.

### 5.1.1.2 La référence

Comme nous l'avons signalé, le potentiel se mesure par une différence entre un point donné et un point de référence. Dans l'idéal, l'électrode de référence aurait

exactement la valeur de potentiel du scalp et serait insensible aux générateurs de courant intracérébraux. Comme cette référence idéale n'existe pas, plusieurs solutions sont utilisées avec une électrode de référence placée sur le nez, sur le lobe d'une oreille ou en Cz (électrode centrale). La référence à l'oreille engendre des déséquilibres droite/gauche qui peuvent être palliés en prenant comme référence la valeur de potentiel des oreilles liées. Une autre technique couramment adoptée est celle de la référence moyenne : le potentiel moyen de tout le scalp est calculé (valeur moyenne de toutes les électrodes) et soustrait à la valeur de chaque voie d'enregistrement.

#### **5.1.1.3 L'amplification du signal**

Les potentiels enregistrés doivent être amplifiés à la source avant leur transport vers le convertisseur analogique/digital (utilisé dans l'enregistrement EEG) car celui-ci mesure des potentiels de l'ordre du mV alors que les différences de potentiels enregistrés en surface sont de l'ordre du  $\mu$ V. Cette amplification est d'autant plus nécessaire car le rapport signal/bruit a tendance à augmenter avec le transport du courant. Une première amplification est réalisée au niveau du boîtier de connexion des électrodes, avec un amplificateur par électrode. Le courant passe ensuite dans un amplificateur analogique juste avant d'atteindre le convertisseur analogique/digital (fréquence d'échantillonnage de 500 Hz).

#### **5.1.1.4 Le filtrage**

Durant l'acquisition, un filtrage passe-bande [0.1-100] Hz est effectué pour atténuer les effets de l'activité musculaire globale résiduelle.

#### **5.1.1.5 L'enregistrement**

Les potentiels sont enregistrés de façon continue sur toutes les voies tout au long de l'expérience. L'ordinateur enregistrant ces données reçoit aussi des informations sur le type et le temps d'apparition de chaque stimulus. Elles permettent de savoir exactement quelle stimulation a reçu le sujet à quel moment de l'enregistrement EEG continu. Les stimuli sont marqués sur le signal par des « triggers » de stimulation. Les mêmes informations de type et de temps d'apparition peuvent

être enregistrées pour la réponse permettant de connaître la réponse du sujet et son temps de réaction (TR) moyen et d'exclure du signal les essais faux ou au TR aberrant. A la fin de la phase d'acquisition des données, l'expérimentateur dispose donc d'un signal EEG continu du sujet marqué pour chaque stimulation et chaque réponse. Plusieurs traitements seront alors effectués sur ce signal afin d'obtenir les Potentiels Evoqués.

### 5.1.2 Traitement du signal

Un Potentiel Evoqué (ou Event-Related Potential) est une modification de l'activité électrique intracérébrale basale provoquée par la survenue d'un stimulus interne ou externe. L'étude des PE est généralement réalisée en comparant les activations électriques induites par deux ou plusieurs types de stimulations ( $S_1$ ,  $S_2$ , ...). L'expérience consiste à enregistrer les EEG pendant que le sujet reçoit plusieurs types de stimulations, présentées en ordre aléatoire pour éviter les effets d'entraînement. Ces stimulations sont répétées un grand nombre de fois car les modifications du tracé consécutives à une stimulation sont minimales et masquées par le bruit de l'EEG spontané. Seules de multiples apparitions du même stimulus permettent d'augmenter le rapport signal/bruit en moyennant les modifications de l'activité EEG dans une étroite période de temps suivant ces répétitions. Pour chaque sujet, on obtient alors un fichier moyenné par type de stimulation. Dans la plupart des études, plusieurs sujets passent la même expérience, et les résultats obtenus sont moyennés pour le groupe afin de s'affranchir de la variabilité inter-individuelle. A l'issue de ces traitements, on dispose d'un fichier moyenné entre les différents essais et les différents sujets, pour une condition donnée. Les différentes conditions de l'expérience peuvent alors être comparées avec des tests statistiques réalisés sur le signal.

#### 5.1.2.1 Traitements préliminaires

Une première étape du traitement consiste à appliquer 2 filtres : un filtre passe-haut à 1 Hz pour « gommer » d'éventuelles dérives lentes dans le tracé et un filtre passe-bas à 30 ou 40 Hz pour filtrer le signal harmonique de 50 Hz produit par le courant alternatif. Ces filtrages n'impliquent pas de perte importante d'information puisque les variations de potentiel pertinentes en PE se situent approximativement

dans la bande de fréquence [1-15] Hz.

Les artefacts oculaires sont ensuite corrigés car les clignements des yeux induisent d'importantes déviations de potentiels dans les régions frontales. Ces variations ont été enregistrées grâce à deux électrodes supplémentaires placées au-dessus et au-dessous de l'oeil du sujet. La moyenne et la variance d'un clignement moyen vont être calculées sur base du repérage d'un minimum de 20 artefacts dans le signal continu et l'influence de chaque clignement sur les différentes voies d'enregistrement peut alors être évaluée et corrigée.

D'autres artefacts liés par exemple à des mouvements du sujet, des contractions de la mâchoire, des froncements de sourcil ou des mouvements oculaires répétés vont également être supprimés. En fonction du design expérimental, les portions de signal correspondant à de fausses réponses du sujet peuvent être éliminées.

L'enregistrement continu va ensuite être découpé en  $n$  blocs (pour  $n$  stimulations) selon un intervalle pré- et post-stimulation défini par l'expérimentateur. La segmentation se fait en référence aux « triggers » signalant l'apparition et le type de chaque stimulation (grâce à un codage numérique). Une correction de ligne de base est appliquée à tous les blocs, en se basant sur l'activité électrique moyenne précédant la stimulation.

#### 5.1.2.2 Les potentiels évoqués

Après séquençage du signal, les blocs correspondant à des stimuli similaires repérés grâce aux « triggers » vont être moyennés. Cette étape est primordiale car les tracés de potentiels observés jusque là résultent de milliers d'activités différentes simultanées et que c'est en moyennant les tracés d'un même type de stimulation (environ 30 à 40 essais par sujet et par condition selon Picton et coll. (2000)), que l'importance relative des courants électriques aléatoires par rapport à ceux associés à la tâche diminue, et que les potentiels générés par une stimulation (Potentiels Evoqués) vont ressortir.

Pour chaque condition, les tracés individuels sont ensuite moyennés pour tous les sujets d'un même groupe : il en résulte des « grandes moyennes ». Les potentiels évoqués peuvent alors être visualisés pour chaque voie d'enregistrement, sur un graphique représentant l'amplitude du potentiel au cours du temps (Figure 5.3a). On peut ainsi repérer des pics positifs ou négatifs de potentiels ou comparer les tracés de deux ou plusieurs électrodes, et de deux ou plusieurs conditions expérimentales. On peut aussi observer les PE sur des cartographies de potentiels

réalisées par interpolation des valeurs du potentiel en chaque électrode (Figure 5.3b). Cette visualisation permet de voir la distribution des PE sur tout le scalp, à un instant donné.

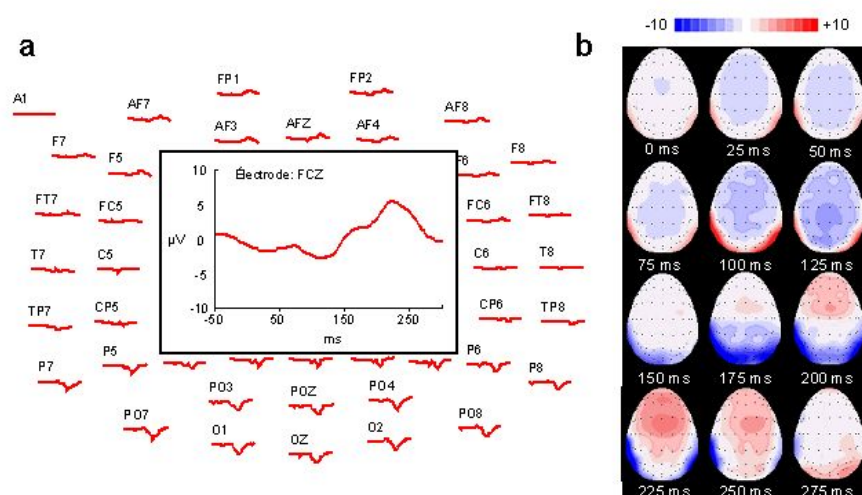


FIGURE 5.3 – Visualisation des Potentiels Evoqués. a. Tracés des amplitudes de potentiel en fonction du temps, sur 64 électrodes (zoom sur l'électrode centrale FCz). b. Cartographies de potentiels à 12 instants de l'enregistrement.

### 5.1.3 Analyses statistiques

#### 5.1.3.1 Comparaisons de latences et d'amplitudes de pics

Avant de réaliser les analyses statistiques, une observation des tracés des grandes moyennes est nécessaire pour repérer les courbes de potentiels des différents pics caractéristiques de la tâche. Pour chacun de ces pics, une électrode de référence est définie et c'est généralement celle à l'amplitude la plus grande. La latence du pic sera celle de cette électrode de référence. Les tracés de toutes les électrodes sont ensuite superposés sur un même axe grâce à la fonction « Mean Global Field Power ». On relève alors sur ce tracé l'intervalle d'apparition de chaque pic et on détecte pour chacun son amplitude et son amplitude moyenne, manuellement ou à l'aide de logiciel automatisé. Pour chaque électrode, l'amplitude du pic est celle relevée à la latence de référence tandis que l'amplitude moyenne est la



moyenne des amplitudes de tous les points de l'intervalle de recherche défini précédemment (Picton et coll. 2000).

Les latences, amplitudes et amplitudes moyennes des différentes conditions expérimentales sont comparées, à l'aide d'ANOVA pour mesures répétées. Les effets des différents facteurs analysés et leurs interactions sont calculés pour chaque événement électrophysiologique. Dans la plupart des études, les réponses des sujets sont enregistrées au cours de la tâche et les taux d'erreurs et temps de réaction peuvent également être analysés avec des ANOVA à mesures répétées.

### 5.1.3.2 Test *t* en séries appariées

Dans certains cas, on peut aussi vouloir comparer des tracés de PE dans certaines régions du scalp sans qu'il y ait de pics de potentiels. Pour ce faire, il est possible de comparer deux conditions expérimentales, par test *t* en séries appariées. Les différences individuelles entre deux conditions sont calculées, en chaque point du tracé de potentiel (une valeur de différence toutes les 2 ms pour un échantillonnage à 500 Hz) et un test *t* est réalisé sur la moyenne de ces différences. On peut alors savoir si la différence entre les deux conditions est significative ou non, tout au long du décours temporel du tracé. Une différence entre deux conditions est considérée comme significative si le test *t* est significatif sur un intervalle de temps suffisamment long (30 ms) (Rugg MDD 1993). En effet, des différences significatives (valeur de *p* du test *t* inférieur à .05) très ponctuelles (durant moins de 30 ms) ne correspondent pas à de véritables divergences de traitement cognitif et ne sont donc pas prises en compte.



## PREMIÈRE EXPÉRIENCE

### 6.1 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Les effets « top-down » lexicaux sur la reconnaissance de mots ont été étudiés chez des enfants normo-lecteurs et dyslexiques à l'aide du paradigme de Reicher-Wheeler. Dans cette tâche de reconnaissance de lettres, nous avons analysé l'effet de supériorité du mot en utilisant des mots et des non-mots de 5 lettres. Pour mettre en évidence à quel moment du traitement, ces effets interviennent, cette expérience a été réalisée en potentiels évoqués. Nous souhaitions également voir l'influence de la position du regard sur ces effets et avons donc fait varier dans le mot la position de la lettre à identifier qui était toutefois toujours présentée au point de fixation central.

#### 6.1.1 Hypothèses

Au niveau comportemental, plusieurs auteurs ont montré un effet de supériorité du mot moins important que chez l'adulte mais néanmoins présent chez les enfants normo-lecteurs. Nous devrions dès lors observer cet effet chez nos sujets contrôles. Les résultats sont plus controversés chez les dyslexiques pour qui cet effet « top-down » lexical n'est pas toujours mis en évidence. Dans la lignée de l'étude de Martin (2005), nous ne pensons pas retrouver de différence significative entre mots et non-mots en reconnaissance de lettres dans notre groupe de dyslexiques.

Notre étude s'inscrit dans le cadre du modèle de lecture IAM de McClelland et Rumelhart (1981). D'après les résultats de la littérature et les hypothèses formulées pour intégrer les effets « top-down » lexicaux à ce modèle, les différences entre mots et non-mots devraient s'observer dès le traitement des lettres, le niveau pré-lexical. Plusieurs études de PE ont mis en évidence des modulations électrophysiologiques dues au traitement pré-lexical au niveau de l'onde N170, dans une fenêtre temporelle de [140 - 190] ms (Bentin et coll. 1999, Cornelissen et coll. 2003). Nous nous attendons donc à des modulations différentes de cette onde N170 entre les conditions « mots » et « non-mots ». Dans son étude utilisant un paradigme similaire au nôtre, Martin (2005) constate effectivement cette divergence mais dans une fenêtre temporelle plus tardive [170-230], délai attribué au masque suivant la stimulation. Comme nous avons postulé l'absence d'effet de supériorité du mot chez les dyslexiques, nous ne devrions pas constater de différence électrophysiologique entre les mots et les non-mots chez ces sujets. Un effet de groupe devrait donc être observé au niveau de l'onde N170, reflétant le traitement des lettres.

En ce qui concerne le transfert interhémisphérique et en accord avec la théorie « split fovea » qui suggère une séparation fonctionnelle du champ visuel entre les 2 hémisphères, nous devrions obtenir une latence retardée pour la P1 à droite en position 1 et à gauche en position 5. En effet, lorsque la lettre à identifier est présentée en première position, l'ensemble du stimulus se situe dans la champ visuel droit et arrive donc directement dans l'hémisphère gauche et l'activation à droite nécessite un transfert. De plus, plusieurs auteurs ont observé un temps de transfert plus rapide de l'hémisphère droit vers l'hémisphère gauche que dans le sens inverse. Cet effet devrait se retrouver dans notre étude.

## 6.1.2 Méthodologie

### 6.1.2.1 Population

Cinquante trois enfants âgés de 8 à 12 ans ont participé à notre étude. Parmi eux, treize ont été exclus car ils n'ont pas mené la tâche à terme à cause d'une trop grande fatigabilité, ou parce que trop peu d'essais étaient exploitables (trop de non réponses ou un tracé EEG trop bruyé). Les analyses ont donc porté sur 40 sujets, 20 dyslexiques et 20 enfants contrôles. Le tableau suivant (tableau 6.1) reprend la répartition par genre et les moyennes d'âges pour les deux groupes de notre étude. Ces 2 groupes étaient appariés en sex ratio ( $p = 0.21$ ) et en âge ( $p = 0.13$ ).

	Contrôles	Dyslexiques
Filles	11	7
Garçons	9	13
âge (moy)	9.7	10.6
âge (ET)	12 mois	18 mois

TABLE 6.1 – *Caractéristiques de genre et d'âge (moy = moyenne et ET = écart-type) des sujets ayant participé à notre étude.*

Tous les sujets étaient de langue maternelle française avec une intelligence moyenne ou supérieure telle qu'évaluée par cinq sub-tests de la version française du WISC-IV (Wechsler 2005). Les indices de Raisonnement Perceptif et de Compréhension Verbale calculés au prorata étaient supérieurs à 85. Les enfants ne présentaient pas de déficit auditif ou visuel non corrigé, de maladie neurologique ou de désordre affectif. Aucun trouble spécifique de l'attention n'était mis en évidence par les items d'inattention de la forme parent du CBCL. Le langage oral était également dans la norme pour tous nos sujets tant sur le plan réceptif, évalué par des tests de compréhensions lexicale (EVIP (Dunn et coll. 1993)) et syntaxique (ECOSSE (Lecocq 1996)), que productif évalué par une épreuve de dénomination d'images (DEN 48) et un test de complétion de phrases (TCG-R (Deltour 1998)).

Les enfants dyslexiques étaient recrutés au centre de référence des troubles des apprentissages de l'hôpital des enfants du CHU Purpan de Toulouse. Les critères d'inclusion pour les sujets de ce groupe sont un retard de lecture d'au moins 18 mois au texte de l'Alouette (Lefavrais 1967) et une vitesse de lecture de mots isolés de l'ODEDYS (Jacquier-Roux et coll. 2002) inférieure à -1,25 écart-type. A l'inverse, les enfants contrôles ne présentaient pas de retard de lecture de plus de 12 mois à l'Alouette et de -0,85 écart-type aux mots de l'ODEDYS. Pour cette population, le recrutement s'est fait sur base d'annonces à l'hôpital, dans certaines écoles toulousaines et dans un centre médical scolaire de Cahors.

### 6.1.2.2 Stimuli

Les stimuli sont une liste de 80 mots et 66 non-mots (voir annexe A.1) de 5 lettres. Ces conditions ont été choisies afin d'obtenir un effet de supériorité du mot maximal. En effet, nous ne pouvions ajouter des pseudomots à l'expérience car elle aurait été trop longue.

Les mots étaient choisis dans la base de données Manulex répertoriant la fréquence de mots pour des lecteurs du CP au CM2 d'école primaire française (Lété et coll. 2004). Les fréquences allaient de 5 à 500 par million pour les niveaux de CE2-CM2. Les non-mots sont des séquences de lettres imprononçables, dont les fréquences de digraphes sont très faibles : 10 par million. Une des contraintes du paradigme de Reicher-Wheeler est que tous les mots sélectionnés doivent avoir un voisin orthographique ne différant que d'une lettre (ex : « table/cable ») et de fréquence lexicale proche. Les listes de mots et de non-mots étaient séparées en deux sous-listes, chaque mot de l'une étant associé à son voisin orthographique dans l'autre liste. La lettre divergente sera systématiquement la lettre cible et sa position varie des positions 1 à 5. Cinq listes de 8 paires de mots ont donc été générées correspondant aux 5 positions. Les voisins orthographiques sont appariés au niveau de la fréquence pour la liste entière ( $F[1,74]=2.1$ ,  $p=0.15$ ) et pour chaque position ( $F[4,74]=0.29$ ,  $p=0.88$ ).

### 6.1.2.3 Tâche et procédure

Les sujets sont assis à 50 cm d'un écran d'ordinateur. Chaque essai débute par la présentation d'une croix de fixation durant 2.5 secondes au centre de l'écran. Après un écran blanc de 50 ms, le stimulus (mot ou non-mot) apparaît durant 84 ms. Ce temps de présentation a été choisi sur la base d'une tâche d'identification de lettre isolée (voir section 6.1.2.4) car à cette durée, tous les enfants obtiennent plus de 90% de réponses correctes. A la suite du stimulus, une séquence de 7 « # » vient masquer l'ensemble de la séquence de lettres. Simultanément, deux lettres majuscules apparaissent, l'une au-dessus et l'autre au-dessous du masque.

Les stimuli sont disposés sur l'écran de telle sorte que la lettre cible s'affiche sur le point de fixation : c'est rendu possible en faisant varier latéralement la position du mot (voir figure 6.1). Le sujet a pour consigne d'indiquer laquelle des deux lettres est la lettre cible précédemment présentée sur le point de fixation en utilisant les boutons « flèches haut/bas » sur le clavier de l'ordinateur. Le masque et les lettres de choix restent à l'écran jusqu'à ce que l'enfant ait répondu. La justesse et les temps de réaction des réponses sont enregistrés. Afin d'augmenter la puissance statistique, chaque mot est présenté deux fois. Les 320 essais sont séparés en 4 blocs où un item de chaque paire est présenté pour éviter l'habituation. L'ordre de présentation est randomisé au sein de chaque bloc. Un petit bloc supplémentaire est réalisé comme entraînement avant l'épreuve afin de nous assurer de la compré-

hension de la consigne.

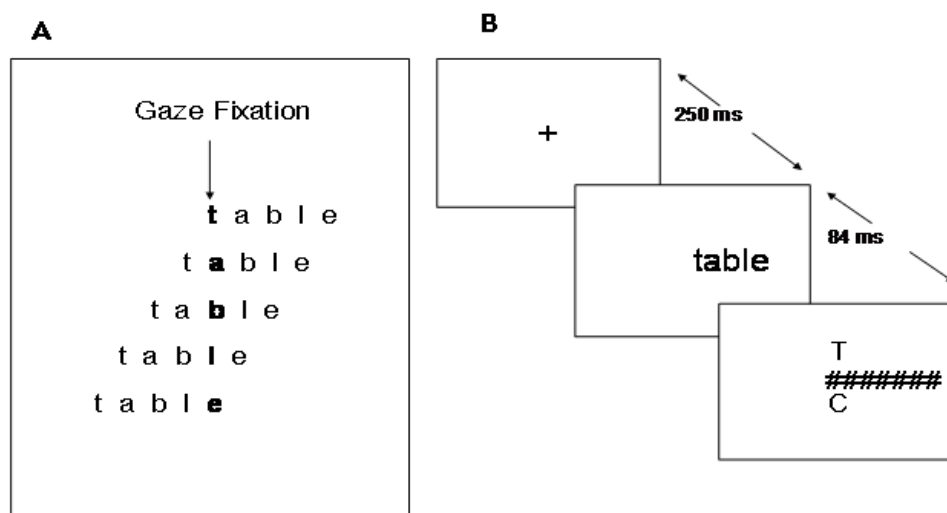


FIGURE 6.1 – (A) Localisation des stimuli sur l'écran, centré sur la première, la deuxième, la troisième, la quatrième ou la cinquième lettre. (B) Paradigme expérimental de la tâche de Reichler-Wheeler

#### 6.1.2.4 Epreuves complémentaires

Lors d'une autre séance, tous les enfants ont passé trois tests supplémentaires d'identification de lettres sans enregistrement de l'électroencéphalogramme.

**Le seuil d'identification de lettres.** Cette tâche d'identification de lettre isolée débute par un point de fixation central présenté pendant 1000 ms suivi d'un écran blanc de 50 ms. Une lettre apparaît ensuite durant 33, 50, 67, 84 ou 101 ms directement masquée par 3 « \* ». Les enfants doivent juste dire quelle est la lettre et l'expérimentateur rentre la réponse sur le clavier de l'ordinateur. Dix stimuli sont proposés dans un ordre aléatoire pour chaque temps de présentation. Les temps de réaction ne sont pas enregistrés.

**Le report global (Valdois et coll. 2004).** Cette tâche visuo-attentionnelle commence comme la précédente par un point de fixation au centre de l'écran

durant 1000 ms. Après un écran blanc de 500 ms, une séquence de 5 lettres non prononçable est présentée pendant 200 ms. Les sujets doivent rapporter oralement les 5 lettres. L'épreuve comporte 20 essais et donc 100 lettres à rappeler, 20 dans chaque position. L'expérimentateur tape les réponses du sujet sur le clavier et les scores totaux et par position sont calculés directement par l'ordinateur. Un entraînement de dix essais était proposé à tous les enfants durant lequel on les prévient d'éventuelles erreurs. Pendant l'épreuve, aucun feedback n'est fourni et les TR ne sont pas enregistrés.

**Le report partiel (Valdois et coll. 2004).** Ce test est similaire au précédent si ce n'est qu'à la fin de la séquence de 5 lettres, une barre verticale apparaît rapidement sous l'une d'elle et le sujet ne doit rapporter que la lettre « marquée ». Cinquante essais sont proposés, dix pour chaque position.

Comme nous souhaitions également évaluer l'influence de l'âge et du niveau de lecture sur ces épreuves de reconnaissance de lettres, nous avons utilisé le test d'inclusion de l'Alouette (Lefavrais 1967) qui permet le calcul d'un âge de lecture. Il consiste à faire lire le plus vite et le mieux possible un texte de 265 mots en un temps de 3 minutes maximum. L'âge de lecture est calculé en fonction du temps de lecture (si moins de 3 min) ou du nombre de mots parcourus, et du nombre d'erreurs.

### 6.1.2.5 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel statistica 7.1. A la tâche de Reicher-Wheeler, le modèle linéaire général a été appliqué aux pourcentages de bonnes réponses et aux médianes des temps de réaction des bonnes réponses. Les facteurs intra-sujets étaient la lexicalité (mots vs non-mots) et la position (1,2,3,4 ou 5) de la lettre et le facteur inter-sujet était le groupe (dyslexiques vs normo-lecteurs). Les âges chronologique et de lecture étaient les covariables. Pour les analyses post hoc, nous avons utilisé le test HSD de Tukey. L'influence des scores aux autres tâches d'identification de lettres sur ceux de Reicher-Wheeler a été déterminée par un modèle général de régressions et les relations entre ces épreuves ont été mesurées par des coefficients de corrélation partielle.

Pour toutes les analyses, les résultats statistiques sont jugés significatifs quand le  $p$  est inférieur à 0.05.



#### 6.1.2.6 Enregistrement et traitement des potentiels évoqués

Les enfants sont confortablement installés face à l'ordinateur de stimulation dans une pièce à la luminosité réduite. On leur demande de bouger le moins possible, d'éviter de cligner des yeux et de garder les doigts sur les boutons réponses. Les données électrophysiologiques sont enregistrées grâce à 32 électrodes Ag/AgCl reliées à des amplificateurs NuAmps<sup>TM</sup> (Neuroscan<sup>TM</sup>, El Paso, TX, USA), à une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz. Une électrode placée sous l'oeil permet d'enregistrer simultanément les mouvements oculaires. Le signal était filtré en ligne entre 0.1 et 100 Hz. Les impédances sont maintenues à des valeurs inférieures à 5 k $\Omega$ .

Les artéfacts oculaires sont éliminés du signal a posteriori à l'aide d'un algorithme de correction avec l'électrode FP1 utilisée comme modèle. Une référence commune est ensuite réalisée sur l'électrode Cz. Les enregistrements continus sont filtrés avec un filtre passe-bande [0.5-30 Hz].

Un découpage du signal continu est découpé dans la fenêtre temporelle [-100 - 1200] ms autour de chaque « trigger » de stimulation. Une correction de la ligne de base relative à l'activité pré-stimulation est appliquée à chaque segment. Les segments correspondants à des réponses incorrectes ou des « non-réponses » sont rejetés. Les parties de signal valides sont alors moyennées afin d'obtenir les moyennes individuelles par condition. Les « grandes moyennes » sont finalement calculées à partir des tracés de PE individuels.

## 6.2 RÉSULTATS

Pour savoir à quel stade de traitement l'effet de lexicalité intervient, nous avons comparé les courbes de PE pour les conditions mots et non-mots toutes positions confondues. De plus, nous avons observé si le signal différait entre dyslexiques et normo-lecteurs à ces étapes. Une recherche automatique des principaux pics de potentiels a été réalisée dans les intervalles de temps définis sur la « Mean Global Field Power » des 64 électrodes (Picton et coll. 2000). Les intervalles de recherche sont [70-140] ms pour la P1, [150-200] ms pour la N1, [200-300] ms pour la NLeft et [300-380] ms pour la P300. Les amplitudes moyennes et les latences des pics sont analysées, par ANOVA à mesures répétées sur les électrodes F3,F7,C3,CP5,P3,P7,O1 à gauche et F4,F8,C4,CP6,P4,P8,O2 à droite. Les facteurs

de l'ANOVA sont la lexicalité (contexte Mot ou Non-mot), l'hémisphère (Gauche ou Droit) et l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe (dyslexiques vs contrôles) comme facteur inter-sujet.

Les seules analyses de PE réalisées en fonction de la position concernent la P1 pour l'étude du transfert hémisphérique car pour les autres événements le nombre de données valables était insuffisant étant donné le nombre important d'erreurs et les essais trop bruités. En effet, il est admis que la P1 intervenant précocement, elle ne dépend pas de la réponse du sujet et les analyses portaient donc sur tous les essais (corrects et incorrects).

## 6.2.1 Résultats comportementaux

### 6.2.1.1 Tâche de Reicher-Wheeler

Les pourcentages de bonnes réponses des deux groupes sont présentés dans la figure 6.2.

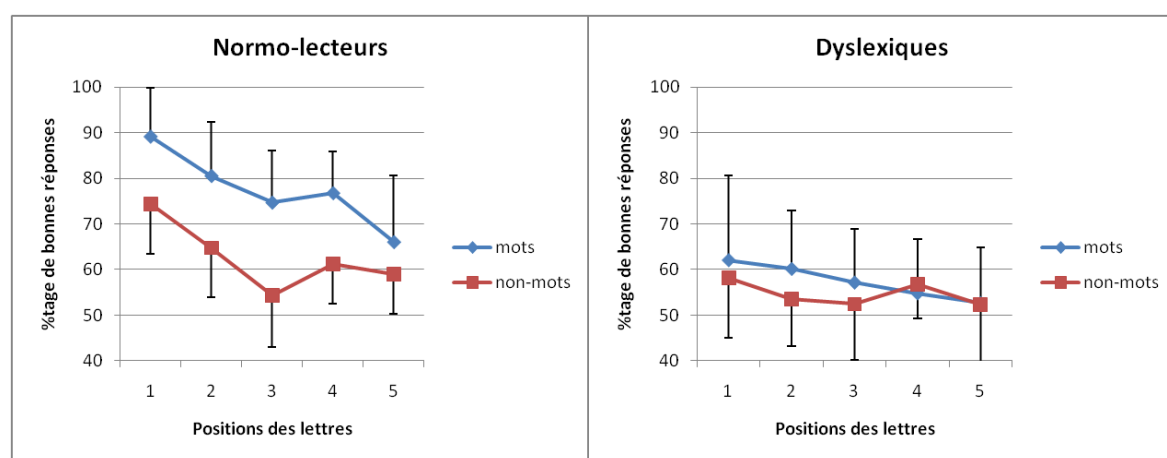


FIGURE 6.2 – Pourcentages moyens de bonnes réponses à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques.

Le modèle linéaire général révèle un effet de groupe significatif ( $F[1,36]= 6.24$ ,  $p=0.017$ ) avec de meilleures performances pour les normo-lecteurs que pour les dyslexiques. Un effet d'âge de lecture est également observé ( $F[1,36]= 17.44$ ,  $p<0.001$ ) tandis que l'effet d'âge chronologique n'est pas significatif ( $F[1,36]= 1.62$ ,  $p=0.21$ ). Les principaux effets de lexicalité ( $F[1,36]= 1.29$ ,  $p=0.26$ ), de position ( $F[4,144]= 0.71$ ,  $p=0.59$ ) et leur interaction ( $F[4,144]= 1.14$ ,  $p=0.34$ ) ne sont pas significatifs.

non plus. En dépit de cela, le test de HSD révèle que, dans la condition « mot », le pourcentage de bonnes réponses est plus important en position 1 qui diffère significativement des 3 dernières ( $p < 0.001$ ). Vient ensuite la position 2 qui diffère uniquement de la position 5 ( $p < 0.001$ ). Le pourcentage de bonnes réponses en position 5 a tendance à différer des positions 3 ( $p = 0.07$ ) et 4 ( $p = 0.09$ ). En condition « non-mots », seule la première position diffère des 4 autres ( $p < 0.001$ ). Nous notons cependant que l'interaction entre la lexicalité et le groupe ( $F[1,36] = 9.04$ ,  $p = 0.004$ ) est significative. Les analyses post-hoc (HSD de Tukey) précisent que l'effet de lexicalité est significatif pour les normo-lecteurs ( $p < 0.001$ ) mais pas pour les dyslexiques ( $p = 0.19$ ).

Une tendance à la significativité est également mise en évidence pour l'interaction entre la position et le groupe ( $F[4,144] = 2.09$ ,  $p = 0.09$ ). Les analyses post-hoc révèlent que le pourcentage de bonnes réponses est plus important chez les normo-lecteurs en position 1 (moyenne=82%) qui diffère significativement des quatre autres ( $p < 0.001$ ). Vient ensuite la position 2 (moyenne=73%) qui ne diffère pas significativement de la position 4 (moyenne=69%) mais qui est significativement mieux réussie que les positions 3 ( $p = 0.01$ ) et 5 ( $p < 0.001$ ). Les différences entre les positions 3 (moyenne=65%), 4 et 5 (moyenne=63%) ne sont pas significatives. Chez les dyslexiques, la seule différence significative concerne les positions 1 (moyenne=60%) et 5 (moyenne= 54%) ( $p = 0.03$ ).

Une analyse statistique similaire a été réalisée sur les médianes des temps de réaction dont les moyennes sont présentées à la figure 6.3.

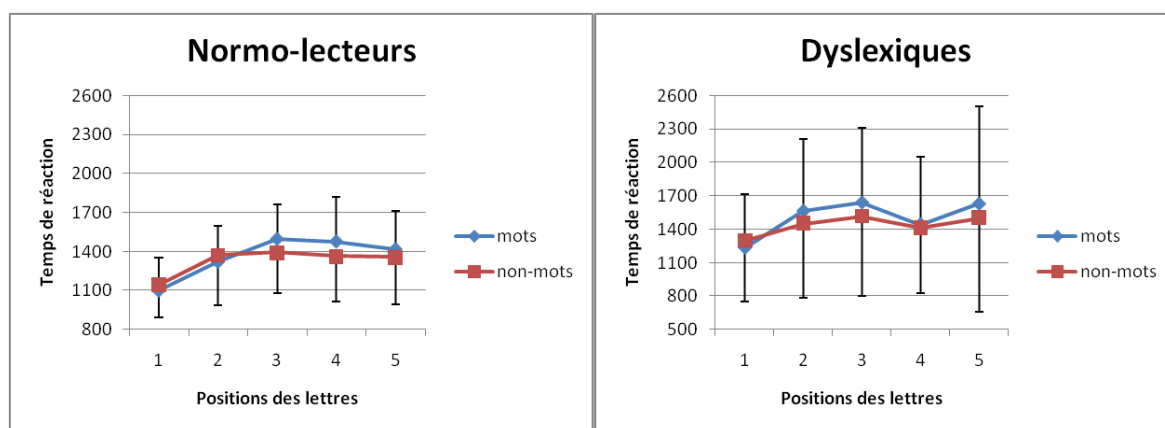


FIGURE 6.3 – Moyennes des temps de réaction à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques.

Les résultats révèlent des effets significatifs de groupe ( $F[1,36] = 4.26$ ,  $p = 0.046$ ) et

d'âge chronologique ( $F[1,36] = 10.79, p=0.002$ ). En revanche, il n'y a pas d'effet d'âge de lecture ( $F[1,36] = 1.04, p=0.31$ ). L'observation des moyennes précise que les enfants normo-lecteurs sont plus rapides (moyenne=1343.6 ms) que les dyslexiques (moyenne= 1469.6 ms).

En ce qui concerne la lexicalité, l'effet principal n'est pas significatif ( $F[1,36] = 0.15, p=0.7$ ) tandis que les interactions avec l'âge chronologique ( $F[1,36] = 5.98, p=0.019$ ) et l'âge de lecture ( $F[1,36] = 6.35, p=0.016$ ) le sont.

Au niveau de la position, une tendance à la significativité est constatée pour l'effet principal ( $F[4,144] = 2.15, p=0.077$ ) mais aucune interaction n'est mise en évidence. L'analyse post-hoc précise que les temps de réaction sont significativement ( $p<0.001$ ) plus courts en première position comparée aux 4 autres qui ne diffèrent pas entre elles.

#### **6.2.1.2 Les tâches de seuil d'identification de lettres et de reports global et partiel**

Les liens entre la tâche de Reicher-Wheeler et les tâches de seuil d'identification de lettres et de reports ont été étudiés à l'aide d'un modèle général de régression. Aucune tâche complémentaire n'a un effet significatif sur la performance à la tâche de Reicher-Wheeler. En revanche, les scores de bonnes réponses à cette dernière, en condition mot uniquement, sont prédits significativement pour les positions 1 ( $R^2=0.64, p=0.02$ ), 3 ( $R^2=0.6, p=0.049$ ), 4 ( $R^2=0.6, p=0.048$ ) et 5 ( $R^2=0.69, p=0.006$ ). Aucune corrélation partielle significative n'est constatée entre les pourcentages de bonnes réponses pour les non-mots au Reicher-Wheeler et les tâches complémentaires. En revanche, des corrélations significatives sont observées entre les mots en position 1 et le report global en 4<sup>ième</sup> position ( $p=0.04$ ); entre la position 3 du Reicher-Wheeler et le seuil d'identification de lettres à 33 ms ( $p=0.02$ ) et entre la position 5 du Reicher-Wheeler et le seuil d'identification de lettres à 84 ms ( $p=0.01$ ) ainsi qu'avec le report global en 3<sup>ième</sup> position ( $p=0.01$ ).

### **6.2.2 Résultats des potentiels évoqués**

#### **6.2.2.1 Événement P1**

La latence moyenne de l'évènement P1 est respectivement de 127.7 (ET = 11.95) et 129.3 ms (ET = 9.41) pour les normo-lecteurs et les dyslexiques. L'analyse de

variance montre que cette différence n'est pas significative ( $F[1,38]=0.27$ ,  $p=0.61$ ). De même, nous n'observons pas d'effet significatif de lexicalité ( $F[1,38]=0.04$ ,  $p=0.85$ ) et d'interaction ( $F[1,38]=0.52$ ,  $p=0.48$ ) entre ces deux facteurs.

Par ailleurs, l'amplitude moyenne de ce pic est significativement plus importante

P1	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	$p=0.61$	$p=0.36$
lexicalité	$p=0.85$	$p=0.34$
hémisphère	<sup>-1</sup>	$p<0.001$
électrode	–	$p<0.001$
groupe x lexicalité	$p=0.48$	$p=0.66$
groupe x hémisphère	–	$p=0.65$
groupe x électrode	–	$p=0.94$
groupe x hémisphère x électrode	–	$p=0.64$
groupe x lexicalité x électrode	–	$p=0.74$
électrode X hémisphère	–	$p<0.001$
électrode x lexicalité	–	$p=0.24$
hémisphère x lexicalité	–	$p=0.13$
hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.78$
hémisphère x lexicalité x électrode	–	$p=0.74$
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.37$

TABLE 6.2 – Événement P1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

dans l'hémisphère droit que gauche ( $F[1,38]=13.89$ ,  $p<0.001$ ) et diffère en fonction de l'électrode observée ( $F[6,226]=116$ ,  $p<0.001$ ). De même, l'interaction entre ces deux facteurs est significative ( $F[6,226]=5.79$ ,  $p<0.001$ ). Les analyses post-hoc révèlent que ce pic est significativement moins ample pour les électrodes frontales comparées aux électrodes temporales ( $p=0.01$ ), pariétales ( $p<0.001$ ) et occipitales ( $p<0.001$ ). Viennent ensuite les électrodes temporales où l'onde est significativement moins ample qu'en pariétal ( $p<0.001$ ). L'onde est la plus importante en occipital où la différence est significative comparée aux autres régions ( $p<0.001$ ). Nous notons également que l'effet d'hémisphère ne s'observe que pour les électrodes temporales ( $p=0.03$ ), pariétales ( $p<0.001$ ) et occipitales ( $p<0.001$ ). Les effets de groupe, de lexicalité et leurs interactions ne sont pas significatifs (voir tableau 6.2).

1. La latence d'un pic est définie à partir d'une électrode de référence et appliquée à l'ensemble des électrodes. Elle est donc identique pour toutes les électrodes et aucun effet d'hémisphères et de régions ne peuvent dès lors être analysé sur la latence.

### 6.2.2.2 Événement N1

L'évènement N1 se manifeste en moyenne à 193.5 ms (ET = 10.23) chez les enfants normo-lecteurs et à 194.9 ms (ET=10.28) chez les dyslexiques. L'analyse de variance, dont les résultats sont présentés ci-après (voir tableau 6.3), révèle que cette différence entre les groupes n'est pas significative ( $F_{[1,38]}=0.26$ ,  $p=0.61$ ). De même, l'effet de lexicalité ( $F_{[1,38]}=0.19$ ,  $p=0.66$ ) et l'interaction entre le groupe et la lexicalité ( $F_{[1,38]}=1.25$ ,  $p=0.27$ ) ne sont pas significatifs.

En ce qui concerne son amplitude moyenne, l'ANOVA révèle un effet principal

N1	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	$p=0.61$	$p=0.17$
lexicalité	$p=0.66$	$p=0.85$
hémisphère	–	$p<0.001$
électrode	–	$p<0.001$
groupe x lexicalité	$p=0.27$	$p=0.71$
groupe x hémisphère	–	$p=0.19$
groupe x électrode	–	$p=0.003$
groupe x hémisphère x électrode	–	$p=0.43$
groupe x lexicalité x électrode	–	$p=0.86$
électrode X hémisphère	–	$p<0.001$
électrode x lexicalité	–	$p=0.65$
hémisphère x lexicalité	–	$p=0.23$
hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.62$
hémisphère x lexicalité x électrode	–	$p=0.96$
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.97$

TABLE 6.3 – Événement N1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

d'hémisphère ( $F_{[1,38]}=14.66$ ,  $p<0.001$ ) avec une onde plus ample dans l'hémisphère droit et un effet d'électrode significatif ( $F_{[1,38]}=20.9$ ,  $p<0.001$ ) avec des ondes plus amples pour les ondes pariétales et occipitales ( $p<0.001$ ) comparées aux ondes frontales et temporales. L'interaction entre ces 2 facteurs (électrode et hémisphère) est également significative ( $F_{[6,228]}=11.75$ ,  $p<0.001$ ) révélant que l'effet d'hémisphère diverge en fonction des électrodes. Les analyses post-hoc montrent que la différence entre les hémisphères n'est significative ( $p<0.001$ ) que pour les électrodes plus postérieures (P3-P4, P7-P8, O1-O2). Notons par ailleurs que l'interaction entre le groupe et l'électrode est significative ( $F_{[6,228]}=3.35$ ,  $p=0.004$ ) avec un effet d'électrode plus important chez les dyslexiques que chez les normo-lecteurs. Pour ces derniers, seules les électrodes P3-P4 ( $p=0.02$ ) et O1-O2 ( $p=0.02$ ) sont signifi-

cativement plus amples que les électrodes F3-F4. Chez les dyslexiques, toutes les électrodes postérieures (P3-P4, P7-P8, O1-O2) diffèrent significativement (tous les  $p < 0.001$ ) des électrodes antérieures (F3-F4, F7-F8, C3-C4, CP5-CP6).

### 6.2.2.3 Événement N2

L'ANOVA réalisée sur les latences de l'onde N2 ne révèle pas de différence significative entre les enfants normo-lecteurs et dyslexiques ( $F[1,38]=0.08$ ,  $p=0.78$ ) puisqu'elle apparaît respectivement après 221.1 ms (ET=16.6) et 222.4 ms (ET=15.4). En revanche, nous constatons un effet de lexicalité ( $F[1,38]=4.12$ ,  $p=0.049$ ) avec un événement N2 plus tardif pour les mots (224.2) que pour les non-mots (219.3). L'interaction entre ces 2 facteurs n'est pas significative ( $F[1,38]=1.01$ ,  $p=0.32$ ).

En ce qui concerne son amplitude moyenne, l'ANOVA révèle un effet principal d'électrode ( $F[2,228]=17.11$ ,  $p < 0.001$ ) avec des ondes moins amples pour les électrodes pariétales P3-P4 comparées aux ondes frontales ( $p < 0.001$ ) et temporales ( $p < 0.001$ ). L'interaction entre ce facteur et l'hémisphère est également significative ( $F[6,228]=3.76$ ,  $p=0.001$ ) et les analyses post-hoc montrent que l'onde est plus ample à gauche uniquement pour les électrodes pariétales inférieures (P7-P8). Notons par ailleurs une tendance à la significativité pour la lexicalité ( $F[1,38]=4.02$ ,  $p=0.05$ ) et une interaction significative entre l'électrode et la lexicalité ( $F[6,228]=5.17$ ,  $p < 0.001$ ) soulignant une amplitude plus importante pour les mots sur les électrodes postérieures, P3-P4 ( $p < 0.001$ ), P7-P8 ( $p < 0.001$ ) et O1-O2 ( $p=0.01$ ). Finalement, l'interaction entre la lexicalité et l'hémisphère ( $F[1,38]=6.61$ ,  $p=0.01$ ) est également significative révélant une onde plus ample à gauche uniquement en condition 'mot' ( $p < 0.001$ ).

N2	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	p=0.78	p=0.26
lexicalité	p=0.049	p=0.05
hémisphère	–	p=0.38
électrode	–	p<0.001
groupe x lexicalité	p=0.32	p=0.56
groupe x hémisphère	–	p=0.26
groupe x électrode	–	p=0.15
groupe x hémisphère x électrode	–	p=0.28
groupe x lexicalité x électrode	–	p=0.86
électrode X hémisphère	–	p=0.001
électrode x lexicalité	–	p<0.001
hémisphère x lexicalité	–	p=0.01
hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.55
hémisphère x lexicalité x électrode	–	p=0.09
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.81

TABLE 6.4 – Événement N2 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

#### 6.2.2.4 Événement P300

L'événement P300 apparaît en moyenne à 315.1 ms +/- 20.7 pour les enfants normo-lecteurs et à 320.4 ms +/- 25.7 pour les dyslexiques. L'analyse de variance nous signifie que la différence entre les groupes n'est pas significative ( $F[1,38]=0.68$ ,  $p=0.41$ ). De même, la latence de l'onde P300 ne diffère pas significativement en fonction de la lexicalité ( $F[1,38]=1.89$ ,  $p=0.17$ ) et il n'y a pas d'interaction entre les facteurs groupe et lexicalité ( $F[1,38]=0.61$ ,  $p=0.44$ ).

L'analyse de variance sur l'amplitude moyenne montre un effet significatif de l'électrode ( $F[6,228]=85.12$ ,  $p<0.001$ ) et une interaction entre l'électrode et l'hémisphère ( $F[2,228]=2.64$ ,  $p=0.02$ ). Les analyses post-hoc soulignent que l'onde P300 est plus ample sur les électrodes pariétales et occipitales qu'en frontal ( $p<0.001$ ) et en temporal ( $p<0.001$ ). La différence est également significative entre les électrodes frontales et temporales ( $p<0.001$ ), l'onde étant plus ample sur ces dernières. De plus, l'effet d'hémisphère s'observe uniquement au niveau des électrodes pariétales inférieures ( $p=0.03$ ) avec une onde plus ample à droite.



P300	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	p=0.41	p=0.94
lexicalité	p=0.18	p=0.22
hémisphère	–	p=0.46
électrode	–	p<0.001
groupe x lexicalité	p=0.44	p=0.7
groupe x hémisphère	–	p=0.58
groupe x électrode	–	p=0.73
groupe x hémisphère x électrode	–	p=0.07
groupe x lexicalité x électrode	–	p=0.2
électrode X hémisphère	–	p=0.02
électrode x lexicalité	–	p=0.22
hémisphère x lexicalité	–	p=0.13
hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.4
hémisphère x lexicalité x électrode	–	p=0.84
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.95

TABLE 6.5 – Événement P300 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

### 6.2.2.5 Transfert inter-hémisphérique

Nous avons recensé les latences individuelles de P1 pour chaque position dans les deux hémisphères. La composante P1 ayant une distribution maximale dans la région occipitale (Arroyo et coll. 1997, Bonmassar et coll. 2001) et les sites latéraux permettant une meilleure estimation du temps de transfert inter-hémisphérique que les sites médians (Saron et Davidson 1989), nous avons réalisé nos analyses sur les électrodes PO9 et PO10.

Les tracés de trois enfants, 2 dyslexiques et 1 normo-lecteur, étant trop bruités, ils n'ont pu être intégrés aux analyses qui ont donc porté sur 37 enfants, 19 contrôles et 18 dyslexiques.

Nous avons effectué une analyse de variance avec la position (5 positions), la lexicalité (mots vs non-mots) et l'hémisphère (gauche et droite) comme variables intra-sujets et le groupe comme variable inter-sujets. Les résultats montrent un effet principal de position significatif [ $F(4,140)=6.05$ ,  $p<0.001$ ] ainsi qu'une interaction entre la position et l'hémisphère [ $F(4,140)=6.96$ ,  $p<0.001$ ]. Les analyses post-hoc précisent que l'onde P1 est plus tardive aux positions 1 ( $p<0.001$ ) et 5 ( $p<0.001$ ) comparées à la position 2. En ce qui concerne l'hémisphère, on constate qu'à gauche, la latence est retardée en position 5 comparée à toutes les autres (position 1 :  $p=0.001$ , position 2 :  $p<0.001$ , position 3 :  $p<0.001$ , position 4 :  $p=0.005$ ). À droite, en revanche, c'est en position 1 que la latence est la plus tardive et l'effet

est significatif pour les positions 2 ( $p < 0.001$ ), 3 ( $p = 0.03$ ) et 4 ( $p = 0.002$ ) alors qu'il n'y a qu'une tendance par rapport à la 5<sup>ème</sup> position ( $p = 0.06$ ). L'interaction entre hémisphère et position est représentée dans la figure 6.4.

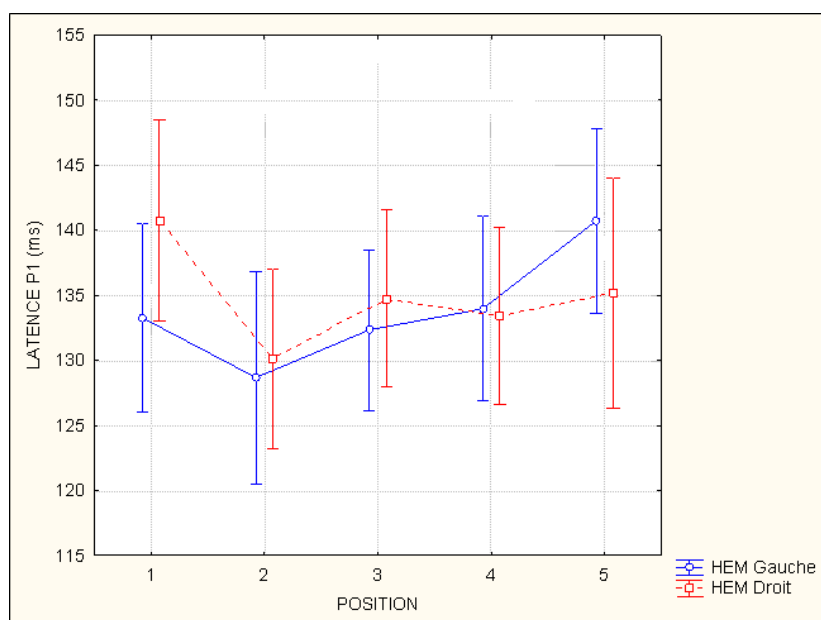


FIGURE 6.4 – Interaction entre position et hémisphère pour la latence de P1

Les effets principaux de groupe [ $F(1,35) = 0.26$ ,  $p = 0.61$ ], d'hémisphère [ $F(1,35) = 0.77$ ,  $p = 0.39$ ] et de lexicalité [ $F(1,35) = 0.01$ ,  $p = 0.91$ ] ne sont pas significatifs. De même, nous ne relevons pas d'autre interaction significative.

Afin de comparer les temps de transfert inter-hémisphérique, nous les avons calculés pour chaque sujet avec les formules suivantes :

Transfert Gauche-Droite (T G-D) = Latence (P1Droite) - Latence (P1Gauche)

Transfert Droite-Gauche (T D-G) = Latence (P5Gauche) - Latence (P5Droite)

Un test t pour échantillons appariés a été réalisé et ne souligne pas de différence significative [ $t(34) = 0.49$ ,  $p = 0.63$ ] entre les transferts inter-hémisphériques de la droite vers la gauche (5.6 ms) et de la gauche vers la droite (7.5 ms).

## 6.3 DISCUSSION

### 6.3.1 Données comportementales

Plusieurs études ont mis en évidence un effet de supériorité du mot chez les enfants normo-lecteurs (Grainger et coll. 2003) et nos résultats vont dans le sens de ces recherches puisque nous retrouvons un effet de lexicalité dans notre groupe de normo-lecteurs. Toujours en accord avec la littérature, nous retrouvons un effet de groupe avec de meilleurs scores pour les enfants normo-lecteurs que pour les dyslexiques. Chez ces derniers, les données concernant l'effet de supériorité du mot sont plus controversées puisque certains auteurs retrouvent cet effet pour ces sujets (Grainger et coll. 2003) alors que Martin (2005) n'observe pas de différence comportementale entre mots et non-mots chez des adultes normo-lecteurs et dyslexiques. Dans notre travail, l'interaction entre la lexicalité et le groupe est significative et les analyses post-hoc précisent que l'effet de supériorité du mot ne s'observe que pour les normo-lecteurs.

Les pourcentages de bonnes réponses des enfants normo-lecteurs de notre étude sont inférieurs (77% pour les mots et 62% pour les non-mots) à ceux présentés par Grainger et coll. (2003) pour un groupe d'enfants de 11 ans d'âge moyen (85% pour les mots et 66% pour les non-mots) mais similaires aux scores des enfants de 7 ans et demi (76% pour les mots et 62% pour les non-mots) rapportés par ces mêmes auteurs. Rappelons que nos sujets avaient un âge moyen intermédiaire (9 ans 7 mois) et que le temps de présentation des stimuli étaient plus courts (84 ms) que celui de Grainger et coll. (2003) (200 ms).

L'effet de supériorité du mot répliqué uniquement chez les normo-lecteurs dans notre expérience soulignerait la mise en place d'effets « top-down » lexicaux en identification de lettres dans un mot mais pourrait également refléter un effet du contexte orthographique. Cependant, plusieurs études ont montré que les dyslexiques présentent les mêmes effets de contexte orthographique or le WSE n'est pas significatif chez ces enfants dans notre étude. Nous émettons dès lors l'hypothèse d'un déficit d'effet « top-down » lexical chez les enfants dyslexiques. Précisons cependant que, dans notre étude, il n'est pas possible de faire la part des choses entre les facteurs « top-down » lexicaux et les influences du contexte orthographique qui sont confondus quand on compare les conditions mots et non-mots. Pour pallier cela, il faudrait réaliser une étude similaire incluant des pseudomots, stimuli non-lexicaux ayant un contexte orthographique légal.

Quand on analyse l'influence de la position de la lettre à identifier dans la séquence, nous constatons chez les normo-lecteurs que la première lettre est plus aisément détectée que les deuxième et quatrième lettres elles-mêmes plus facilement identifiées que les lettres en positions 3 et 5. Chez les dyslexiques, la seule différence entre les positions concerne la comparaison entre les positions 1 et 5 au profit de la première. Ce résultat va à l'encontre de certaines données de la littérature qui ne retrouvent pas d'asymétrie gauche-droite chez les dyslexiques. Ainsi, Ducrot et coll. (2003) observaient, dans une tâche d'identification de mots et de lettres dans un mot, chez des enfants dyslexiques un effet de position du regard avec la présence de l'OVP mais aucune différence quand les lettres initiales ou finales sont fixées. Ils interprètent cette absence d'asymétrie gauche-droite (meilleurs résultats quand la cible apparaît dans le champ visuel droit) comme un traitement anormal des informations parafovéales chez les dyslexiques. Ces derniers ne développeraient pas de biais de traitement de l'information présentée dans le champ visuel droit. Dans notre étude, nous ne retrouvons pas d'OVP chez les enfants normo-lecteurs et dyslexiques mais l'asymétrie gauche-droite est observée dans les 2 groupes et pour les 2 conditions (mots et non-mots). Cet effet peut s'expliquer par une combinaison de l'effet de masquage latéral et un traitement séquentiel des lettres de gauche à droite. En effet, plusieurs études (Townsend et coll. 1971, Pernet et coll. 2005) ont montré qu'une lettre est moins bien reconnue si elle est entourée d'autres lettres, qui « bruitent » l'information visuelle. Les lettres situées aux extrémités sont ainsi plus facilement reconnues car la quantité d'information venant bruite l'identification est réduite. En revanche, les lettres situées en milieu de séquence patissent d'un masquage plus important. Ceci permet d'expliquer les meilleurs résultats en première position et le moins bon score en troisième position. Cependant, les résultats en position 5 soulignent que le masquage latéral n'explique pas l'ensemble de l'effet de position.

Par ailleurs, ces résultats vont à l'encontre de ceux obtenus chez des adultes normo-lecteurs par Martin (2005). En effet, dans son étude utilisant un paradigme similaire, les performances étaient les meilleures en deuxième position pour les mots et elle proposait que l'effet de masquage latéral était renversé par les effets « top-down » lexicaux. Chez les enfants, il semble que ces effets sont présents pour les normo-lecteurs avec une différence entre les mots et les non-mots mais que le masquage latéral est encore trop important et les résultats restent meilleurs en première position.

Plusieurs hypothèses de la littérature peuvent expliquer l'effet de position signi-

ficatif retrouvé en condition 'mot'. Ainsi, l'asymétrie de visibilité des lettres a été étudiée par plusieurs auteurs (Bouma 1973, Nazir 1991, Nazir et coll. 1992; 1998) qui ont mis en évidence que les lettres n'ont pas la même visibilité selon leur position. En effet, la visibilité serait meilleure pour les lettres situées à droite du point de fixation que celles à gauche de celui-ci. Cependant, cette hypothèse n'explique pas l'absence d'interaction significative entre la lexicalité et la position.

Dans le même ordre d'idée, nos résultats en condition 'mot' peuvent être regardés à la lumière de l'hypothèse d'une communication interhémisphérique en lecture de mots (Hunter et coll. 2007). Les données présentées par Martin et coll. (2007) vont à l'encontre de l'idée que l'ensemble des informations visuelles sont simultanément envoyés aux 2 hémisphères puisqu'elle observe un délai d'activation dans l'hémisphère gauche quand l'ensemble du mot est présenté dans l'hémichamp gauche (point de fixation sur la dernière lettre) comparé à une présentation dans l'hémichamp droit (fixation sur la première lettre). Les résultats significativement meilleurs pour les premières lettres que pour les dernières dans notre expérience pourraient s'expliquer par le fait qu'une quantité plus importante d'information lexicale est directement reçue par l'hémisphère gauche quand le point de fixation se situe en début de mot. Le transfert de l'information entre les deux hémisphères pourraient être moins efficient chez les enfants et ainsi réduire l'influence des lettres avoisinantes pour l'identification de la lettre fixée. Cette hypothèse peut expliquer une partie des courbes de résultats puisque nous observons effectivement des performances décroissantes entre la première et la dernière lettre pour les mots chez les contrôles et les dyslexiques. Cependant, l'effet de position mis en évidence pour les non-mots est légèrement différent mais souligne également de meilleurs résultats pour les première et deuxième lettres. Or dans cette condition, le traitement des lettres avoisinantes ne devraient pas influencer les performances. L'influence du transfert inter-hémisphérique sur nos résultats ne peut être tranché ici et nécessite des analyses complémentaires, dont l'analyse des résultats d'EEG en fonction de la position que nous n'avons pu réaliser par manque de données valides.

Les courbes de résultats similaires dans nos deux conditions lexicales et montrant un gradient de performances diminuant de la première à la cinquième position pourraient s'expliquer par un traitement sériel des stimuli de la gauche vers la droite et ce quelque soit le point de fixation (Whitney et Cornelissen 2005). Ce traitement en série pourrait être automatisé et s'effectuer pour tous les types de séquences de lettres et même lorsque la lettre à identifier est en fin de stimulus.

Dans notre étude, les dyslexiques présentaient un profil de position similaire aux normo-lecteurs malgré des performances généralement plus faible. Il semble donc qu'ils effectuent un traitement de gauche à droite comme les normo-lecteurs.

Les résultats sur les temps de réaction montrent une différence entre les sujets normo-lecteurs et dyslexiques au profit des premiers qui sont plus rapides. L'interaction entre le groupe et la lexicalité est à la limite de la significativité avec, chez les enfants dyslexiques, des temps de réaction plus lents pour les mots que pour les non-mots. Il semble que le traitement lexical apparemment moins bons chez ces enfants gêne et ralentisse l'identification de lettre.

Dans leur étude de 2003, Grainger et coll. (2003) comparaient les résultats des enfants dyslexiques avec un groupe de normo-lecteurs apparié en âge et un autre groupe apparié en âge de lecture. Nos deux groupes divergeant sur ces 2 points, nous souhaitions contrôler les effets de ces 2 facteurs sur le pourcentage de réponses correctes et sur les temps de réaction en les intégrant dans notre analyse. Les résultats soulignent un effet de l'âge de lecture sur le pourcentage de bonnes réponses mais pas sur les temps de réaction. Le profil est opposé pour l'âge chronologique avec un effet sur les temps de réaction mais pas d'influence sur le pourcentage de réponses correctes. Aucune interaction avec ces facteurs n'est significative reflétant une influence générale de ceux-ci sur l'identification de lettres et pas particulièrement concernant des effets lexicaux ou positionnels. L'âge de lecture améliorerait les performances en identification de lettres quelque soit la position de celle-ci et son contexte de présentation. De même, l'évolution de l'âge chronologique et la maturation cérébrale permettrait une accélération des temps de réaction quelque soit la condition (mots vs non-mots) et la position de la lettre. Le fait que l'âge de lecture n'influence pas les temps de réaction peut expliquer que nos groupes (dyslexiques vs normo-lecteurs) ne diffèrent pas sur cette variable.

D'autres épreuves d'identification de lettre étaient également proposées à nos sujets et nous avons effectué des régressions entre ces différentes épreuves et notre tâche. Aucune tâche complémentaire n'a d'effet significatif sur la performance à la tâche de Reicher-Wheeler mais les scores de bonnes réponses à cette épreuve sont prédits pour toutes les positions, exceptée la deuxième, en condition mot uniquement. De même, les corrélations partielles ne sont pas significatives pour les non-mots tandis que quelques corrélations sont mises en évidence entre la condition 'mot' et les tâches complémentaires. Ainsi, le seuil de lettres est corrélé avec les positions 3 et 5, qui sont, rappelons le, les positions où les performances sont les plus faibles chez nos sujets. Il semble donc que dans ces positions, la lettre soit trai-

tée similairement à une lettre isolée. Ceci est en accord avec les hypothèses émises précédemment d'une part que le masquage latéral est encore très important chez les enfants et ne permet pas l'utilisation du contexte orthographique. Ce masquage étant maximal en position 3, les résultats sont moindres et corrélés à l'identification de lettres isolées. D'autre part, la visibilité des lettres plus faibles quand elles sont présentées dans l'hémichamp gauche empêche les sujets de s'appuyer sur le contexte orthographique quand la lettre à identifier est en 5<sup>ième</sup> position. Cette dernière est également corrélée avec le report global en 3<sup>ième</sup> position, condition qui ne bénéficie pas d'un contexte orthographique, et qui selon les auteurs de cette épreuve (report) ne souffre pas du masquage latéral de par l'espacement des lettres. Le fait que les corrélations entre le report global et notre tâche ne soit observées qu'en condition 'mot' est surprenant étant donné qu'au RG les stimuli sont des séquences de consonnes. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait qu'au RG, les sujets doivent rapporter toute la séquence et donc porter leur attention sur le stimulus dans son ensemble. Dans la condition 'mot' du Reicher-Wheeler, le fait de porter attention à l'ensemble de la séquence est un avantage car cela permet l'identification du mot et donc un effet facilitateur pour identifier la lettre. Une autre hypothèse pouvant expliquer ces résultats de corrélation presque exclusivement avec la condition 'mot' du Reicher-Wheeler est l'effet plancher observé en condition 'non-mots'. On constate en effet que de nombreux sujets et surtout dans le groupe des dyslexiques ont des résultats proches du niveau du hasard.

### 6.3.2 Potentiels évoqués

#### 6.3.2.1 Événement P<sub>1</sub>

L'événement P<sub>1</sub> observé dans notre expérience ne diffère pas entre les conditions ni au niveau de sa latence ni concernant son amplitude. L'absence d'effet de lexicalité à ce stade est congruent avec les données de la littérature qui montrent que la discrimination entre mots et non-mots (Simon et coll. 2004) ou entre séquences linguistiques et non linguistiques (Rossion et coll. 2003) n'affecte pas les PE dans les 150 premières ms suivant la présentation du stimulus.

La topographie de l'onde P<sub>1</sub> est similaire à celle décrite dans des travaux antérieurs avec une onde plus ample dans les zones pariétales et occipitales (Martin 2005) et au niveau de l'hémisphère droit (Martin 2005, Kutas et coll. 1988).

### 6.3.2.2 Événement N<sub>1</sub>

Les différences de performances entre les contextes lexical et non-lexical au niveau des résultats comportementaux confirment l'intervention de processus « top-down » lexicaux dans l'identification de lettres : l'information lexicale d'un mot en mémoire augmente le niveau d'activation de toutes les lettres. Le but de notre étude était de voir à l'aide des potentiels évoqués, à quel moment ces effets « top-down » intervenaient. Les hypothèses formulées pour intégrer ces effets au modèle IAM (McClelland et Rumelhart 1981) postulent l'apparition de différence électrophysiologique entre mots et non-mots dès l'onde N<sub>1</sub>. Celle-ci peut être assimilée à l'événement N<sub>170</sub> considéré dans la littérature comme reflétant le traitement pré-lexical des lettres. En effet, Brem et coll. (2009) soulignent que les amplitudes de la N<sub>1</sub> sont généralement plus importantes pour des stimuli linguistiques (mots, lettre ou séquences de lettres) que pour des caractères non linguistiques (symboles, formes géométriques) mais qu'elles ne diffèrent pas entre les stimuli orthographiques (mots, pseudomots, non-mots) (Bentin et coll. 1999, Rossion et coll. 2003). Nos résultats sont en accord avec cela puisque nous n'observons pas d'effet de lexicalité au niveau de cette onde contrairement à ce que nous avons postulé en accord avec l'étude de Martin (2005) pour qui une différence significative entre mots et non-mots était mise en évidence sur l'onde N<sub>1</sub>.

Nos résultats sont donc à la fois en désaccord avec l'hypothèse d'une influence des représentations lexicales en mémoire sur l'identification de lettres à un niveau pré-lexical mais vont aussi à l'encontre d'un traitement lexical dès l'onde N<sub>1</sub>. En effet, face à l'effet de lexicalité observé dès l'onde N<sub>1</sub>, des auteurs (Sereno et coll. 2003) ont proposé que des traitements lexicaux pourraient être réalisés dès 150 ms post-stimulation.

Rappelons encore que dans son étude, Martin (2005) comparait deux temps de présentation (50 et 66 ms) et qu'elle n'observait cet effet de lexicalité sur la N<sub>170</sub> que pour un temps de présentation plus long. Il sera dès lors intéressant de voir si cet effet est obtenu chez les enfants pour une tâche similaire avec un allongement du temps de présentation.

### 6.3.2.3 Événement N<sub>2</sub>

Les premières différences entre les conditions 'mot' et 'non-mots' sont observées aux alentours de 220 ms sur l'onde N<sub>2</sub> et concernent à la fois la latence et



l'amplitude de cette onde. Nous notons ainsi que l'événement N2 apparaît plus tardivement pour les mots mais qu'il est plus ample pour ces stimuli. La différence entre conditions ne s'observe que dans l'hémisphère gauche et sur les électrodes pariétales et occipitales. Cet événement négatif semble refléter la phase lexicale du traitement d'une séquence de lettres permettant de distinguer les mots des non-mots. Plusieurs auteurs ont obtenu des effets hémisphériques similaires en comparant le traitement de mots et de non-mots (Cohen et coll. 2000, Martin 2005). Ces différences ont été interprétées par Cohen et coll. (2000) comme l'implication du gyrus fusiforme gauche en reconnaissance des formes visuelles des mots (Cohen et coll. 2000, McCandliss et coll. 2003). En effet, ces auteurs proposent qu'une négativité occipito-temporale gauche aux alentours de 200 ms (N2), prolongée pour les mots par rapport aux non-mots, corresponde à l'activation du 'Visual Word Form System'. Cette temporalité reflèterait la transition entre les effets purement visuels, induits par la présentation d'un mot, et le début des effets lexicaux.

Rappelons cependant que le débat reste ouvert quant à la temporalité de l'accès lexical au cours de la lecture, puisque les expériences réalisées sur les effets de fréquence lexicale ont mené à des résultats aussi variables qu'une sensibilité lexicale précoce (150 ms) (Sereno et coll. 1998, Proverbio et coll. 2004) à des différences n'apparaissant que 500 ms après stimulation (Polich et Donchin 1988). Il n'en demeure pas moins que nos résultats sont en accord avec de nombreuses expériences répertoriant des activations latéralisées à gauche, entre 180 et 250 ms post-stimulation, spécifiques à la présentation de mots (Pammer et coll. 2004, Proverbio et coll. 2002, Salmelin et coll. 1996, Tarkiainen et coll. 1999).

#### 6.3.2.4 P300

La latence de la P300 reflèterait le temps de catégorisation du stimulus traité (Kutas et coll. 1977, Polich 1986) et contrairement à Martin (2005) nous n'observons pas de différence significative entre les conditions 'mot' et 'non-mot' à ce niveau. Il semble donc que nos sujets ne catégorisent pas plus rapidement les non-mots que les mots et ceci peut s'expliquer par le fait que cette catégorisation n'est pas demandée explicitement et n'est pas nécessaire pour notre tâche. Il se peut que cette catégorisation soit moins automatisée chez les enfants que chez les adultes normo-lecteurs de l'étude de Martin (2005).

Quant à l'amplitude de la P300, elle est plutôt connue pour refléter la charge attentionnelle allouée au traitement d'un stimulus (Kramer et Strayer 1988, Wickens

et coll. 1983). Nous n'observons pas d'effet de lexicalité ou de groupe sur cette onde. Il semble donc que la charge attentionnelle allouée aux mot et aux non-mots est similaire et qu'elle ne diffère pas entre les enfants normo-lecteurs et dyslexiques. Ces résultats concordent avec les données de la littérature (Martin 2005). Concernant sa localisation, l'amplitude de la P300 est maximale au niveau des électrodes pariétales dans notre étude. D'après certains auteurs (Donchin et coll. 1986, Polich et Kok 1995), une positivité à ce niveau serait plutôt associée aux opérations de mémoire de travail. L'implication de cette composante est évidente dans notre tâche qui nécessite le maintien en mémoire de la lettre cible le temps de fournir la réponse.

### 6.3.2.5 Transfert inter-hémisphérique

De par la nature de notre paradigme, lorsque la lettre à identifier était en première position, l'ensemble du stimulus était présenté dans le champ visuel droit. A l'inverse, pour l'identification de la cinquième lettre, le stimulus est présenté dans le champ visuel gauche. Nos résultats nous permettent d'appuyer l'hypothèse de Brysbaert (1994) selon laquelle l'information visuelle provenant d'items présentés en vision fovéale n'est pas envoyée simultanément aux deux hémisphères cérébraux, quand ces items sont fixés à leurs extrémités. Ils vont à l'encontre de l'idée encore répandue que les mots présentés en vision fovéale sont transmis (en deux copies complètes) en parallèle aux deux hémisphères (Leventhal 1988, Stone et coll. 1973, Trauzettel-Klosinski et Reinhard 1998). La forte interaction entre positions et hémisphères observée dans l'analyse des latences de P1 illustre le fait que ces latences sont très différentes dans les deux hémisphères selon la position de la lettre dans la séquence.

En ce qui concerne le temps de transfert inter-hémisphérique, les études antérieures l'estiment à environ 10-15 ms (Brown et coll. 1998, Saron et Davidson 1989) pour certaines et 30-40 ms pour d'autres (Martin 2005). Dans notre travail, ce temps est légèrement inférieur puisqu'il est plutôt de 6-8 ms. Par ailleurs, nos résultats ne confirment pas le fait que le transfert serait plus rapide de droite à gauche que de gauche à droite (Ipata et coll. 1997, Saron et Davidson 1989) puisque nous n'obtenons pas de différence significative entre les 2 temps de transfert. Il est probable que cette absence de différence soit due au fait que nos sujets étaient des enfants et que cette différence apparaît plus tardivement.

Signalons encore que nous ne retrouvons pas d'effet de lexicalité, ce qui est attendu

étant donné que la P1 apparaît bien avant tout traitement de la lexicalité. L'absence d'effet de groupe va dans le sens des études précédentes avec un temps de transfert inter-hémisphérique similaire chez les normo-lecteurs et chez les dyslexiques.



## DEUXIÈME EXPÉRIENCE

### 7.1 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Certains des enfants dyslexiques ayant passé la première expérience avaient des résultats proches du niveau du hasard à la tâche de Reicher-Wheeler et montraient un effet de temps de présentation en identification de lettres. L'absence de certains effets pouvant être liée à cet effet plancher, nous avons choisi d'augmenter le temps de présentation des mots et des non-mots au Reicher-Wheeler.

#### 7.1.1 Hypothèses

Au niveau comportemental, nous nous attendons à obtenir un effet du temps de présentation sur le pourcentage de bonnes réponses avec de meilleurs scores à 101 ms qu'à 84 ms pour les deux groupes de sujets. En revanche, au vu des résultats de Martin (2005), nous ne pensons pas observer de différence sur les temps de réaction. Concernant les effets de lexicalité et de position, si l'allongement du temps de présentation permet un traitement du stimulus entier, nous devrions observer un effet de lexicalité plus important et un effet de position optimale du regard avec une courbe de résultats en J-inversé.

En potentiels évoqués, nous pourrions obtenir un effet de lexicalité sur l'onde N1 chez les sujets contrôles si l'allongement du temps de présentation permet un

traitement lexical. C'est en effet, ce qui était observé par Martin (2005) qui obtenait un effet de lexicalité sur cette onde uniquement pour un temps de présentation plus long chez des adultes normo-lecteurs.

Par ailleurs, l'effet de temps de présentation devrait être mis en évidence sur les ondes N1 et N2 avec des pics significativement retardés et réduits à 101 ms.

### 7.1.2 Méthodologie

La procédure de cette seconde expérience est identique à la première excepté donc le temps de présentation qui était ici de 101 ms.

#### 7.1.2.1 Participants

Vingt-quatre enfants ont participé à cette expérience et 4 ont été exclus en raison de données manquantes. Les analyses ont donc porté sur 20 enfants dont 10 dyslexiques et 10 normo-lecteurs. Leurs caractéristiques sont reprises dans le tableau suivant.

	Contrôles	Dyslexiques
Filles	5	3
Garçons	5	7
âge (moy)	9.11	10.2
âge (ET)	12 mois	18 mois

TABLE 7.1 – Caractéristiques de genre et d'âge (moy= moyenne et ET = écart-type) des sujets ayant participé à la seconde expérience.

#### 7.1.2.2 Analyses statistiques

Le modèle linéaire général, comme dans la première expérience, sera utilisé sur les pourcentages de bonnes réponses et les médianes des temps de réactions pour un temps de présentation à 101 ms.

Les résultats des deux temps de présentation seront comparés à l'aide d'une analyse de variance avec la lexicalité et la position comme variables dépendantes.

## 7.2 RÉSULTATS

En observant les données de la première expérience, nous nous sommes aperçus de résultats comportementaux au niveau du hasard chez certains enfants dyslexiques. Nous nous sommes dès lors demandés si les effets divergents entre normo-lecteurs et dyslexiques ne pouvaient être liés à cet effet plancher. Pour pallier cela, nous avons réalisé la même tâche avec un temps de présentation plus long. Dans cette section, nous présenterons d'abord les résultats comportementaux pour ce nouveau temps de présentation. Ensuite, nous poursuivrons avec les analyses d'un éventuel effet de temps de présentation et terminerons avec les résultats de potentiels évoqués.

### 7.2.1 Analyses comportementales

#### 7.2.1.1 Tâche de Reicher-Wheeler

Les pourcentages de bonnes réponses sont repris dans la figure 7.1 Un modèle linéaire général avec la lexicalité (mots vs non-mots) et la position (1,2,3,4 et 5) comme facteurs intra-sujets et le groupe (normo-lecteurs ou dyslexiques) comme facteur inter-sujets a été réalisé. Les âges chronologique et de lecture étaient les covariables. Le seul effet significatif mis en évidence concerne l'âge de lecture [ $F(1,16)=8.34, p<0.011$ ].

Une analyse similaire a été réalisée sur les temps de réaction des bonnes réponses et aucun effet significatif n'est observé. Les moyennes des temps de réaction sont présentés dans la figure 7.2.

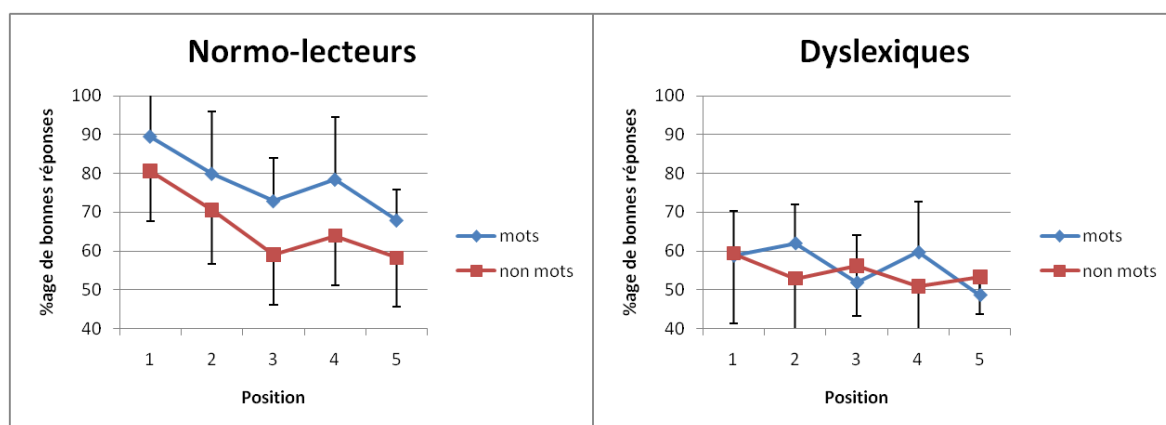


FIGURE 7.1 – Pourcentages moyens de bonnes réponses à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques pour un temps de présentation de 101 ms.

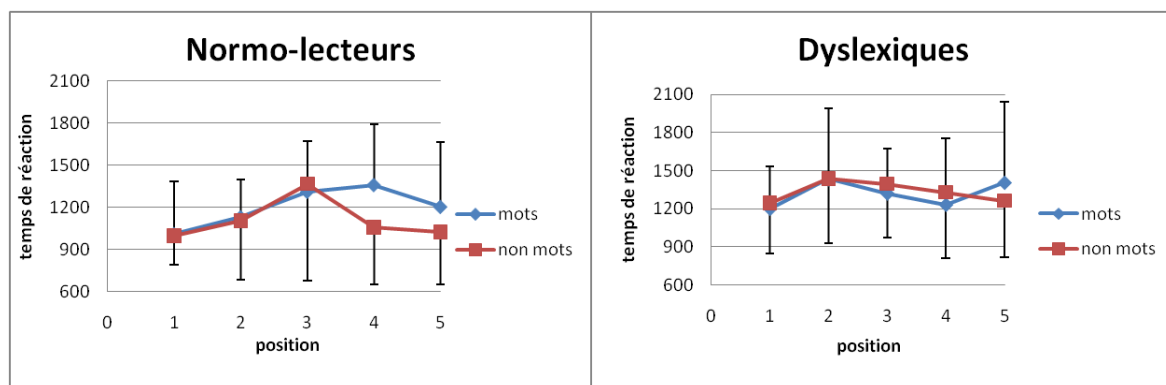


FIGURE 7.2 – Temps de réaction moyens à la tâche de Reicher-Wheeler pour les 5 positions en conditions mots et non-mots pour les enfants normo-lecteurs et dyslexiques pour un temps de présentation de 101 ms.

### 7.2.1.2 Effet de temps de présentation

Les effets de temps de présentation ont été analysés à l'aide d'un modèle linéaire général similaire avec le groupe (normo-lecteurs vs. dyslexiques) et le temps de présentation (84 ms ou 101 ms) comme facteurs inter-sujets, et la lexicalité (mots vs non-mots) et la position (1,2,3,4,5) comme facteurs intra-sujets. Les âges chronologique et de lecture étaient les covariants. Les résultats ne soulignent pas d'effet du temps de présentation [ $F(1,54)=0.19, p=0.66$ ] ni aucune interaction avec ce facteur. Les effets principaux de groupe [ $F(1,54)=6.78, p=0.01$ ] et d'âge de lecture [ $F(1,54)=24.37, p<0.001$ ] sont significatifs tandis que les effets d'âge chronologique [ $F(1,54)=1.82, p=0.18$ ], de lexicalité [ $F(1,54)=0.03, p=0.86$ ] et de position [ $F(1,54)=0.26, p=0.9$ ] ne le sont pas. En revanche, les interactions entre la



lexicalité et le groupe [ $F(1,54)=6.88, p=0.01$ ] ainsi qu'entre la position et le groupe [ $F(4,216)=2.79, p=0.027$ ] sont significatives. Les analyses post-hoc montrent que l'effet de lexicalité n'est significatif que pour les normo-lecteurs ( $p<0.001$ ) et pas pour les dyslexiques ( $p=0.17$ ) (voir figure 7.3). L'effet de position est également plus important chez les normo-lecteurs avec de meilleurs résultats en position 1 (moyenne=83%) qui diffère significativement des cinq autres ( $p<0.001$ ). Vient ensuite la position 2 (moyenne=74%) qui ne diffère pas significativement ( $p=0.51$ ) de la position 4 (moyenne=70%) mais qui est significativement mieux réussie que les positions 3 ( $p<0.001$ ) et 5 ( $p<0.001$ ). Les différences entre les positions 3 (moyenne=65%), 4 et 5 (moyenne=63%) ne sont pas significatives. Chez les dyslexiques, la seule différence significative concerne les positions 1 (moyenne=60%) et 5 (moyenne= 52%) ( $p<0.001$ ). Cette interaction est illustrée à la figure 7.4.

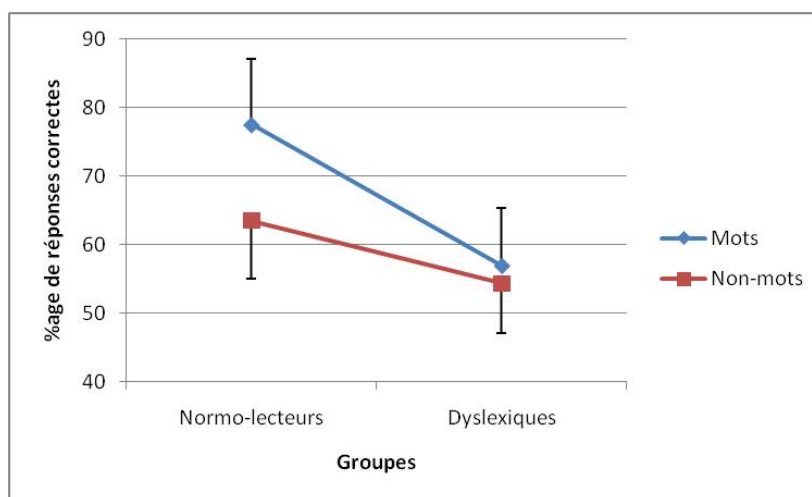


FIGURE 7.3 – Interaction entre le groupe et la lexicalité.

Les autres interactions ne sont pas significatives.

### 7.2.2 Résultats des potentiels évoqués : 101 ms

Les résultats de potentiels évoqués ont été effectués sur 19 enfants, 9 normo-lecteurs et 10 dyslexiques. Les tracés d'un enfant n'ont pu être pris en compte car ils étaient trop bruités. Pour chaque onde pertinente pour notre étude ( $P_1$ ,  $N_1$ ,

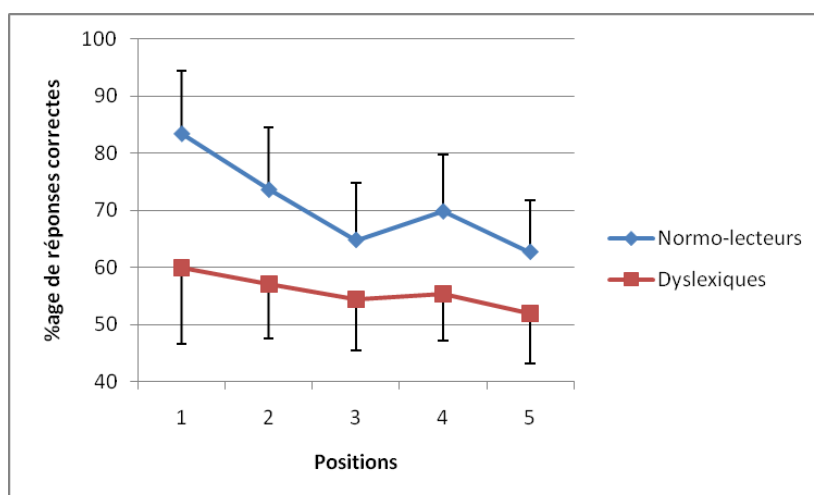


FIGURE 7.4 – Interaction entre le groupe et la position.

N2 et P300), nous avons analysé les résultats sur les latences à l'aide d'ANOVA pour mesures répétées avec le groupe comme facteur inter-sujet (normo-lecteurs vs. dyslexiques) et la lexicalité comme facteur intra-sujet (mots vs. non-mots). Les effets d'hémisphère et d'électrode n'ont pas lieu d'être étant donné que la latence d'un pic est identique pour toutes les électrodes car définie à partir d'une électrode de référence et appliquée à l'ensemble des électrodes du scalp. En revanche, pour les amplitudes moyennes, l'hémisphère (droit vs. gauche) et les électrodes (F3, F4, F7, F8, C3, C4, CP5, CP6, P3, P4, P7, P8, O1, O2) ont été ajoutés à l'analyse comme facteurs intra-sujets.

Pour ce temps de présentation, nous n'avons pas réalisé les analyses sur le temps de transfert hémisphérique étant donné le nombre de sujets trop restreint et donc un manque de données exploitables. Il est à préciser que la latence de l'onde P1 est connue pour ne pas être influencée par le temps de présentation.

### 7.2.2.1 Événement P1

L'analyse de variance pour mesures répétées réalisée sur les latences du pic P1 ne révèle pas d'effet significatif de groupe [ $F(1,17)=0.4, p=0.53$ ], de lexicalité [ $F(1,17)=0.05, p=0.83$ ] ou d'interaction entre ces facteurs [ $F(1,17)=0.86, p=0.37$ ].

Au niveau de l'amplitude moyenne, on observe des effets principaux significatifs de lexicalité [ $F(1,17)=7.17, p=0.016$ ], d'hémisphère [ $F(1,17)=4.83, p=0.042$ ] et d'électrode [ $F(6,102)=45.26, p<0.0001$ ]. L'observation des amplitudes moyennes permet de préciser ces résultats avec une onde P1 plus ample pour les non-mots que pour

les mots. L'amplitude moyenne est plus importante dans l'hémisphère droit que dans le gauche et pour les électrodes occipitales puis pariétales ( $p=0.02$ ), l'onde étant la moins ample en frontal ( $p<0.001$ , par rapport aux électrodes pariétales et occipitales). Nous notons également une interaction entre l'hémisphère, l'électrode et le groupe à la limite de la significativité [ $F(6,102)=2.06, p=0.064$ ]. Le test de HSD de Tukey montre que l'onde ne diverge pas entre les hémisphères pour les enfants dyslexiques tandis qu'une différence significative ( $p=0.003$ ) est observée pour les normo-lecteurs dont l'amplitude est plus grande à droite sur les ondes frontales inférieures (F7-F8).

P1	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	$p=0.53$	$p=0.23$
lexicalité	$p=0.83$	$p=0.02$
hémisphère	–	$p=0.04$
électrode	–	$p<0.001$
groupe x lexicalité	$p=0.37$	$p=0.87$
groupe x hémisphère	–	$p=0.69$
groupe x électrode	–	$p=0.72$
groupe x hémisphère x électrode	–	$p=0.07$
groupe x lexicalité x électrode	–	$p=0.66$
électrode X hémisphère	–	$p=0.62$
électrode x lexicalité	–	$p=0.51$
hémisphère x lexicalité	–	$p=0.5$
hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.24$
hémisphère x lexicalité x électrode	–	$p=0.3$
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.6$

TABLE 7.2 – Événement P1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

### 7.2.2.2 Événement N1

La latence de l'événement N1 ne diffère pas significativement entre les groupes [ $F(1,17)=0.24, p=0.63$ ] mais une tendance à la significativité est constatée pour l'effet de lexicalité [ $F(1,17)=3.49, p=0.079$ ] avec une onde plus tardive pour les non-mots (moyenne=194.8, ET=7.7) que pour les mots (moyenne=190.2, ET=12.5). L'interaction entre ces facteurs n'est pas significative.

L'ANOVA réalisée sur l'amplitude moyenne ne révèle pas d'effet principal mais une interaction significative entre l'hémisphère et l'électrode [ $F(6,102)=3.49, p=0.004$ ]. L'analyse post-hoc souligne un effet d'hémisphère uni-

quement sur les électrodes pariétales inférieures ( $p=0.008$ ) avec une onde plus ample à gauche pour ces électrodes.

N1	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	$p=0.63$	$p=0.61$
lexicalité	$p=0.078$	$p=0.35$
hémisphère	–	$p=0.24$
électrode	–	$p=0.62$
groupe x lexicalité	$p=0.62$	$p=0.42$
groupe x hémisphère	–	$p=0.23$
groupe x électrode	–	$p=0.55$
groupe x hémisphère x électrode	–	$p=0.77$
groupe x lexicalité x électrode	–	$p=0.32$
électrode X hémisphère	–	$p=0.004$
électrode x lexicalité	–	$p=0.5$
hémisphère x lexicalité	–	$p=0.88$
hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.81$
hémisphère x lexicalité x électrode	–	$p=0.28$
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.27$

TABLE 7.3 – Événement N1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

### 7.2.2.3 Événement N2

L'analyse de variance réalisée sur les latences de l'onde N2 ne souligne pas de différence significative [ $F(1,17)=1.33, p=0.27$ ] entre les enfants dyslexiques et les normo-lecteurs. En revanche, l'effet de lexicalité est significatif [ $F(1,17)=4.88, p=0.041$ ] avec une onde plus tardive pour les mots (moyenne=228.6, ET=8.3) que pour les non-mots (moyenne=225.3, ET=7.2). L'interaction entre les deux facteurs n'est pas significative [ $F(1,17)=0.06, p=0.81$ ].

En ce qui concerne l'amplitude moyenne, le principal effet d'électrode est significatif [ $F(6,102)=5.84, p<0.001$ ] de même que l'interaction entre l'électrode et le groupe [ $F(6,102)=2.24, p=0.045$ ] et entre l'électrode et l'hémisphère [ $F(6,102)=3.99, p=0.001$ ]. Les analyses post-hoc montrent que l'effet d'électrode concerne surtout les électrodes pariétales supérieures (P3-P4) où l'onde est moins ample que pour les autres électrodes ( $p<0.001$ ) et cet effet est plus important pour les normo-lecteurs que pour les dyslexiques. Nous notons également que l'effet d'hémisphère ne

concerne que les électrodes pariétales et occipitales avec une onde plus ample dans l'hémisphère gauche ( $p < 0.001$ ).

N2	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	$p=0.27$	$p=0.24$
lexicalité	$p=0.041$	$p=0.44$
hémisphère	–	$p=0.43$
électrode	–	$p < 0.001$
groupe x lexicalité	$p=0.8$	$p=0.73$
groupe x hémisphère	–	$p=0.89$
groupe x électrode	–	$p=0.045$
groupe x hémisphère x électrode	–	$p=0.51$
groupe x lexicalité x électrode	–	$p=0.98$
électrode X hémisphère	–	$p=0.001$
électrode x lexicalité	–	$p=0.51$
hémisphère x lexicalité	–	$p=0.64$
hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.84$
hémisphère x lexicalité x électrode	–	$p=0.13$
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.37$

TABLE 7.4 – Événement N2 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

#### 7.2.2.4 Événement P300

Les latences de l'onde P300 ne diffèrent pas significativement entre les groupes [ $F(1,17)=0.91, p=0.35$ ] et en fonction de la lexicalité [ $F(1,17)=1.03, p=0.33$ ]. De même, nous ne retrouvons pas d'interaction significative entre ces facteurs [ $F(1,17)=0.38, p=0.55$ ].

L'analyse de variance effectuée sur les amplitudes moyennes de l'onde P300 révèle un effet principal d'électrode [ $F(6,102)=33.04, p < 0.001$ ] et une interaction entre l'électrode, l'hémisphère et le groupe [ $F(6,102)=2.29, p=0.041$ ]. Une tendance à la significativité est constatée concernant l'interaction entre les électrodes et le groupe [ $F(6,102)=1.87, p=0.09$ ]. L'onde P300 est plus ample pour les électrodes pariétales et occipitales puis temporales ( $p < 0.001$ ) et l'onde est moindre en frontal ( $p=0.01$  par rapport aux électrodes pariétales). Les analyses post-hoc montrent que cet effet d'électrode est plus marqué pour les normo-lecteurs que pour les dyslexiques et que l'effet d'hémisphère est plus important sur les électrodes pariétales inférieures ( $p=0.01$ ) uniquement chez les dyslexiques. Pour ces électrodes, l'onde est plus

ample dans l'hémisphère droit que gauche.

P300	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	p=0.35	p=0.43
lexicalité	p=0.33	p=0.6
hémisphère	–	p=0.57
électrode	–	p<0.001
groupe x lexicalité	p=0.55	p=0.6
groupe x hémisphère	–	p=0.72
groupe x électrode	–	p=0.09
groupe x hémisphère x électrode	–	p=0.041
groupe x lexicalité x électrode	–	p=0.12
électrode X hémisphère	–	p=0.15
électrode x lexicalité	–	p=0.87
hémisphère x lexicalité	–	p=0.41
hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.43
hémisphère x lexicalité x électrode	–	p=0.83
électrode x hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.91

TABLE 7.5 – Événement P300 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe comme facteur inter-sujet

### 7.2.3 Résultats des potentiels évoqués : effet du temps de présentation

Les effets de temps de présentation ont été analysés à l'aide d'ANOVA similaires avec les mêmes facteurs intra-sujets mais avec le groupe (normo-lecteurs vs. dyslexiques) et le temps de présentation (84 ms ou 101 ms) comme facteurs inter-sujets.

#### 7.2.3.1 Événement P1

Aucun effet n'est significatif concernant la latence de l'onde P1.

En revanche, au niveau de l'amplitude, nous constatons des effets principaux de lexicalité [ $F(1,55)=4.99, p=0.03$ ], avec une onde plus ample pour les non-mots que pour les mots, d'électrode [ $F(6,330)=135.32, p<0.001$ ] et d'hémisphère [ $F(1,55)=16.74, p<0.001$ ], avec une onde plus ample dans l'hémisphère droit.

P1	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	p=0.39	p=0.13
TP	p=0.8	p=0.42
lexicalité	p=0.75	p=0.03
hémisphère	–	p<0.001
électrode	–	p<0.001
groupe x TP	p=0.75	p=0.65
groupe x lexicalité	p=0.2	p=0.86
groupe x hémisphère	–	p=0.52
groupe x électrode	–	p=0.76
groupe x hémisphère x électrode	–	p=0.02
groupe x lexicalité x électrode	–	p=0.54
groupe x lexicalité x TP	p=0.56	p=0.71
groupe x hémisphère x TP	–	p=0.84
groupe x électrode x TP	–	p=0.84
groupe x TP x électrode x hémisphère	–	p=0.11
groupe x TP x électrode x lexicalité	–	p=0.58
groupe x électrode x hémisphère x lexicalité	–	p=0.2
groupe x TP x électrode x hémisphère x lexicalité	–	p=0.35
lexicalité x TP	p=0.9	p=0.31
électrode X hémisphère	–	p=0.05
électrode x lexicalité	–	p=0.52
électrode x TP	–	p=0.82
électrode x lexicalité x TP	–	p=0.17
électrode x hémisphère x TP	–	p=0.04
hémisphère x lexicalité	–	p=0.97
hémisphère x TP	–	p=0.66
hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.16
hémisphère x lexicalité x TP	–	p=0.15
hémisphère x lexicalité x groupe x TP	–	p=0.26
hémisphère x lexicalité x électrode	–	p=0.31
électrode x hémisphère x lexicalité x TP	–	p=0.02

TABLE 7.6 – Événement P1 : Résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet

L'analyse post-hoc montre que l'onde est significativement plus ample sur les électrode occipitales ( $p<0.001$ ) comparées aux électrodes pariétales ( $p<0.001$ ) où elle est plus ample qu'en temporal. L'onde est la moins ample sur les électrodes frontales ( $p<0.001$ ). D'autre part, les interactions hémisphère x l'électrode [ $F(6,330)=2.18, p=0.045$ ], hémisphère x électrode x groupe [ $F(6,330)=2.68, p=0.015$ ] et hémisphère x électrode x temps de présentation [ $F(6,330)=2.25, p=0.04$ ] sont significatives. Les analyses post-hoc précisent que l'effet d'hémisphère n'est significatif que pour les électrodes temporales ( $p=0.04$ ) et pariétales ( $p<0.001$ ). Chez les normo-

lecteurs, l'effet d'hémisphère concerne les électrodes frontales inférieures ( $p=0.01$ ) et pariétales antérieures ( $p=0.005$ ) tandis que chez les dyslexiques, il est significatif pour les électrodes pariétales antérieures ( $p<0.001$ ) et postérieures ( $p=0.03$ ). De même, l'effet d'hémisphère est significatif sur les ondes pariétales ( $p<0.001$ ) à 84 ms et uniquement sur les ondes frontales inférieures ( $p=0.01$ ) à 101 ms. Finalement, l'interaction entre l'hémisphère, l'électrode, le temps de présentation et la lexicalité [ $F(6,330)=2.56, p=0.02$ ] est significative et les analyses post-hoc précisent que l'effet de lexicalité n'est significatif qu'à 101 ms, sur l'électrode frontale inférieure droite ( $p<0.001$ ).

### 7.2.3.2 Événement N1

Les analyses sur la latence de l'onde N1 ne montrent pas d'effet significatif. En ce qui concerne son amplitude, nous soulignons des effets principaux du temps de présentation [ $F(1,55)=6.95, p=0.01$ ], de l'électrode [ $F(6,330)=10.19, p<0.001$ ] et d'hémisphère [ $F(1,55)=9.93, p=0.003$ ]. L'onde N1 est plus ample à 101 ms et dans l'hémisphère gauche. Elle est également plus ample sur les ondes frontales et temporales ( $p<0.001$ ) comparées aux ondes pariétales et occipitales. Les interactions entre l'électrode et le groupe [ $F(6,330)=2.84, p=0.01$ ], l'électrode et le temps de présentation [ $F(6,330)=4.98, p<0.001$ ] et entre l'électrode et l'hémisphère [ $F(6,330)=10.24, p<0.001$ ] sont significatives. Les analyses post-hoc précisent que l'effet d'électrode n'est significatif que pour les dyslexiques. De même, il n'est observé qu'à 84 ms. Par ailleurs, l'effet d'hémisphère n'est significatif qu'au niveau des ondes pariétales ( $p<0.001$ ) et occipitales ( $p<0.001$ ). Les interactions électrode x l'hémisphère x lexicalité x groupe, électrode x l'hémisphère x lexicalité x temps de présentation et électrode x l'hémisphère x lexicalité x groupe x temps de présentation sont significatives. Les analyses post-hoc montrent que l'onde N1 est plus ample pour les mots ( $p<0.001$ ) uniquement chez les normo-lecteurs sur l'électrode frontale inférieure droite et pour un temps de présentation de 101 ms.

### 7.2.3.3 Événement N2

L'ANOVA réalisée sur la latence de l'onde N2 révèle un effet de lexicalité significatif [ $F(1,55)=5.02, p=0.03$ ] avec un événement plus précoce pour les non-mots. Au niveau de son amplitude, les analyses montrent un effet d'électrode significatif



N1	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	p=0.48	p=0.22
TP	p=0.48	p=0.01
lexicalité	p=0.26	p=0.41
hémisphère	–	p=0.003
électrode	–	p<0.001
groupe x TP	p=0.88	p=0.72
groupe x lexicalité	p=0.31	p=0.68
groupe x hémisphère	–	p=0.1
groupe x électrode	–	p=0.01
groupe x hémisphère x électrode	–	p=0.36
groupe x lexicalité x électrode	–	p=0.32
groupe x lexicalité x TP	p=0.78	p=0.4
groupe x hémisphère x TP	–	p=0.93
groupe x électrode x TP	–	p=0.87
groupe x TP x électrode x hémisphère	–	p=0.99
groupe x TP x électrode x lexicalité	–	p=0.09
groupe x électrode x hémisphère x lexicalité	–	p=0.03
groupe x TP x électrode x hémisphère x lexicalité	–	p=0.04
lexicalité x TP	p=0.1	p=0.54
électrode X hémisphère	–	p<0.001
électrode x lexicalité	–	p=0.25
électrode x TP	–	p<0.001
électrode x lexicalité x TP	–	p=0.34
électrode x hémisphère x TP	–	p=0.14
hémisphère x lexicalité	–	p=0.47
hémisphère x TP	–	p=0.16
hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.97
hémisphère x lexicalité x TP	–	p=0.69
hémisphère x lexicalité x groupe x TP	–	p=0.62
hémisphère x lexicalité x électrode	–	p=0.06
électrode x hémisphère x lexicalité x TP	–	p=0.02

TABLE 7.7 – Événement N1 : résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet

[F(6,330)=19.16,p<0.001] ainsi qu'une interaction entre l'électrode et l'hémisphère [F(6,330)=6.62,p<0.001]. Le test HSD de Tukey précise que l'onde est moins ample sur l'électrode pariétale antérieure comparée à toutes les autres (p<0.001). Nous notons par ailleurs un effet d'hémisphère sur l'onde pariétale postérieure avec une onde plus ample à gauche. L'interaction électrode x groupe x temps de présentation est aussi significative [F(6,330)=3.97,p<0.001] et les résultats post-hoc montrent que l'effet d'électrode n'est significatif qu'à 84 ms pour les 2 groupes et qu'un effet moindre est constaté pour les normo-lecteurs à 101 ms, avec une onde plus

ample sur l'électrode pariétale antérieure comparée aux ondes frontales seulement ( $p=0.01$ ). Finalement, deux interactions avec la lexicalité sont observées : électrode x hémisphère x lexicalité [ $F(6,330)=3.32, p=0.003$ ] et électrode x hémisphère x lexicalité x temps de présentation [ $F(6,330)=2.17, p=0.045$ ]. Les analyses post-hoc soulignent que l'onde N2 est plus ample pour les mots ( $p<0.001$ ) uniquement à gauche à 84 ms en pariétal et occipital et, pour un temps de présentation de 101 ms sur l'onde frontale inférieure droite.

N2	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	$p=0.47$	$p=0.48$
TP	$p=0.14$	$p=0.45$
lexicalité	$p=0.03$	$p=0.08$
hémisphère	–	$p=0.25$
électrode	–	$p<0.001$
groupe x TP	$p=0.72$	$p=0.07$
groupe x lexicalité	$p=0.45$	$p=0.55$
groupe x hémisphère	–	$p=0.6$
groupe x électrode	–	$p=0.55$
groupe x hémisphère x électrode	–	$p=0.23$
groupe x lexicalité x électrode	–	$p=0.93$
groupe x lexicalité x TP	$p=0.58$	$p=0.93$
groupe x hémisphère x TP	–	$p=0.45$
groupe x électrode x TP	–	$p<0.001$
groupe x TP x électrode x hémisphère	–	$p=0.73$
groupe x TP x électrode x lexicalité	–	$p=0.97$
groupe x électrode x hémisphère x lexicalité	–	$p=0.12$
groupe x TP x électrode x hémisphère x lexicalité	–	$p=0.16$
lexicalité x TP	$p=0.68$	$p=0.55$
électrode X hémisphère	–	$p<0.001$
électrode x lexicalité	–	$p=0.1$
électrode x TP	–	$p=0.71$
électrode x lexicalité x TP	–	$p=0.02$
électrode x hémisphère x TP	–	$p=0.44$
hémisphère x lexicalité	–	$p=0.09$
hémisphère x TP	–	$p=0.88$
hémisphère x lexicalité x groupe	–	$p=0.94$
hémisphère x lexicalité x TP	–	$p=0.46$
hémisphère x lexicalité x groupe x TP	–	$p=0.61$
hémisphère x lexicalité x électrode	–	$p=0.003$
électrode x hémisphère x lexicalité x TP	–	$p=0.05$

TABLE 7.8 – Événement N2 : résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet

### 7.2.3.4 Événement P300

La latence de P300 diffère significativement entre les temps de présentation avec une onde plus précoce à 101 ms [ $F(1,55)=7.01, p=0.01$ ]. Les autres effets ne sont pas significatifs

D'autre part, son amplitude diffère significativement en fonction de l'électrode

P300	Latences	Amplitudes moyennes
groupe	p=0.21	p=0.45
TP	p=0.01	p=0.93
lexicalité	p=0.14	p=0.27
hémisphère	–	p=0.35
électrode	–	p<0.001
groupe x TP	p=0.73	p=0.51
groupe x lexicalité	p=0.38	p=0.56
groupe x hémisphère	–	p=0.96
groupe x électrode	–	p=0.05
groupe x hémisphère x électrode	–	p=0.002
groupe x lexicalité x électrode	–	p=0.04
groupe x lexicalité x TP	p=0.94	p=0.91
groupe x hémisphère x TP	–	p=0.53
groupe x électrode x TP	–	p=0.35
groupe x TP x électrode x hémisphère	–	p=0.9
groupe x TP x électrode x lexicalité	–	p=0.99
groupe x électrode x hémisphère x lexicalité	–	p=0.92
groupe x TP x électrode x hémisphère x lexicalité	–	p=0.92
lexicalité x TP	p=0.85	p=0.68
électrode X hémisphère	–	p=0.01
électrode x lexicalité	–	p=0.36
électrode x TP	–	p=0.69
électrode x lexicalité x TP	–	p=0.95
électrode x hémisphère x TP	–	p=0.59
hémisphère x lexicalité	–	p=0.11
hémisphère x TP	–	p=0.89
hémisphère x lexicalité x groupe	–	p=0.75
hémisphère x lexicalité x TP	–	p=0.99
hémisphère x lexicalité x groupe x TP	–	p=0.23
hémisphère x lexicalité x électrode	–	p=0.99
électrode x hémisphère x lexicalité x TP	–	p=0.55

TABLE 7.9 – Événement P300 : résultats de l'analyse de variance avec la lexicalité, l'hémisphère, l'électrode comme facteurs intra-sujets et le groupe et le temps de présentation (TP) comme facteurs inter-sujet

[ $F(6,330)=101.4, p<0.001$ ] avec une onde plus ample sur les électrodes pariétales et

occipitales ( $p < 0.001$ ), qui ne diffèrent pas entre elles, suivies des électrodes temporelles ( $p < 0.001$ ). L'onde est la moins ample en frontal comparée à toutes les autres régions ( $p < 0.001$ ). L'interaction entre l'électrode et l'hémisphère est également significative [ $F(6,330) = 2.86, p = 0.01$ ] avec une onde plus ample dans l'hémisphère droit uniquement sur les électrodes pariétales postérieures. L'interaction significative entre l'électrode, l'hémisphère et le groupe [ $F(6,330) = 3.61, p = 0.002$ ] montre que cet effet d'hémisphère sur les électrodes pariétales postérieures n'est significatif que chez les dyslexiques ( $p = 0.002$ ). Une interaction significative entre l'électrode, la lexicalité et le groupe [ $F(6,330) = 2.24, p = 0.04$ ] est également mise en évidence mais l'analyse post-hoc ne révèle aucun effet de lexicalité significatif.

## 7.3 DISCUSSION

Dans notre première expérience, plusieurs enfants dyslexiques avaient des résultats proches du niveau du hasard en condition 'non-mots'. Pour essayer de pallier ce biais, nous avons proposé la même tâche avec un temps de présentation plus long à un autre groupe d'enfants. Cette mesure ne s'avère cependant pas suffisante car pour certaines positions, les résultats restent au niveau du hasard chez les enfants dyslexiques.

### 7.3.1 Données comportementales

Dans cette deuxième expérience, seul un effet d'âge de lecture est constaté sur le pourcentage de bonnes réponses. Les effets de groupe, de lexicalité et de position observés dans l'expérience précédente ne sont pas retrouvés. Le fait que ces effets ne soient pas significatifs semble dû à l'effectif restreint de cette seconde expérience. L'absence d'effet de temps de présentation et d'interaction avec ce facteur va dans le sens de cette hypothèse puisqu'il semble effectivement que les effets de lexicalité, de groupe et de position s'expriment de la même façon pour les 2 temps de présentation mais qu'ils ne se révèlent pas significatifs dans la seconde expérience.

Par ailleurs, cette absence d'effet du temps de présentation est en désaccord avec ce que Martin (2005) observait. En effet, elle mettait en évidence un effet facilitateur de l'augmentation du temps de présentation. Cette divergence peut s'expliquer en partie par les différences de paradigmes entre ces deux études puisque dans son

étude, les deux temps de présentations étaient proposés aux mêmes sujets. Nous n'avons pas choisi cette option d'une part parce qu'elle rendait l'expérience trop longue pour des enfants et d'autre part parce que nous n'avions pas pour objectif d'analyser ce facteur. En effet, l'utilisation d'un second temps de présentation est venu suite aux résultats de la première étude qui étaient au niveau du hasard dans certaines conditions.

### 7.3.2 Potentiels évoqués

#### 7.3.2.1 Événement P<sub>1</sub>

Contrairement à ce que nous attendions et à ce que nous observons pour un temps de présentation plus court, l'amplitude de l'onde P<sub>1</sub> diverge entre les conditions 'mot' et 'non-mots'. La comparaison entre les temps de présentation confirme cet effet avec une interaction significative entre le temps de présentation, la lexicalité, l'hémisphère et l'électrode. Cette onde se révèle plus ample pour les non-mots que pour les mots. Ces résultats vont dans le sens de l'effet de typicalité mis en évidence par Hauk et coll. (2006) et selon lequel, des stimuli aux bi- ou tri-grammes inconsistants engendrent une P<sub>1</sub> plus ample que pour des stimuli consistants. De par leur caractère, les non-mots de notre étude étaient effectivement inconsistants. Cet effet n'était pas observé pour un temps de présentation plus court reflétant peut-être un traitement plus limité à la lettre et une difficulté à percevoir l'ensemble de la séquence pour ce temps de présentation trop court.

#### 7.3.2.2 Événement N<sub>1</sub>

Dans son étude Martin (2005) met en évidence une différence d'amplitude entre mots et non-mots sur l'onde N<sub>1</sub> uniquement pour un temps de présentation plus long. Nous retrouvons également une tendance vers un effet de lexicalité sur cette onde uniquement pour un temps de présentation plus long mais il concerne sa latence. En effet, nous constatons que cette onde est plus tardive pour les non-mots que pour les mots. Ces résultats vont dans le sens d'une influence des représentations lexicales en identification de lettres dès un niveau de traitement pré-lexical. L'amplitude moins importante pour les dyslexiques que pour les normo-lecteurs observées chez des adultes dans d'autres études ne semble pas être retrouvée chez

les enfants de notre travail. Cependant, quand on compare les temps de présentation, on observe une interaction significative entre le groupe, la lexicalité, l'hémisphère et l'électrode reflétant une onde plus ample pour les mots que les non-mots chez les normo-lecteurs sur l'électrode frontale inférieure droite. Cet effet va donc dans le sens des données de la littérature d'un déficit du traitement des mots à un niveau pré-lexical chez les dyslexiques. Le fait que l'effet ne ressorte pas significativement quand on analyse séparément les résultats à 101 ms peut être lié au petit nombre de sujets ayant passé cette condition.

Les analyses comparant les temps de présentation soulignent par ailleurs que cette onde est plus ample pour un temps de présentation plus long. Ceci est en accord avec l'étude de Martin (2005) qui retrouve également une interaction entre le temps de présentation et la lexicalité. Cette interaction n'est pas significative dans notre travail mais on constate une interaction entre ce temps de présentation, la lexicalité, le groupe, l'hémisphère et l'électrode. Nous notons ainsi que l'onde N1 est plus ample à 101 ms uniquement pour les mots chez les enfants normo-lecteurs. Au vu de ces résultats, on peut suggérer que l'onde N1, connue pour refléter le traitement des lettres dans des séquences de caractères linguistiques, est dépendante du contexte lexical chez les normo-lecteurs uniquement et à condition que le temps de présentation soit assez long. Nos résultats sont donc congruents avec l'hypothèse d'un déficit d'effet « top-down » lexical facilitateur au niveau du traitement des lettres chez les dyslexiques.

### 7.3.2.3 Événement N2

L'onde N2 est répertoriée dans la littérature comme spécifique au traitement des mots et des pseudomots mais pas des non-mots et de stimuli non-alphabétiques. Dans notre étude, nous observons cependant une onde N2 pour les deux conditions. Elle est toutefois plus tardive et plus ample pour les mots. Nous notons aussi qu'elle est plus ample à gauche sur l'électrode pariétale postérieure pour les mots. Ces résultats vont donc dans le sens d'un traitement spécifique des mots dans l'hémisphère gauche aux alentours de 250 ms post-stimulation.

En revanche, nous ne notons pas de différence significative concernant la lexicalité entre les dyslexiques et les normo-lecteurs contrairement à ce qui était mis en évidence par Martin (2005). Cette absence d'effet est d'autant plus étonnante qu'au niveau comportemental, les deux groupes se distinguent. L'interaction entre l'électrode et l'hémisphère soulignant une onde plus ample à gauche sur les ondes

pariétales et occipitales est en accord avec les données de la littérature qui retrouvent une activation occipito-temporale gauche pour le traitement de stimuli linguistiques.

#### **7.3.2.4 Événement P300**

La latence et l'amplitude de la P300 ne diffèrent pas entre nos groupes et les conditions. Ces résultats sont similaires pour les deux temps de présentation et ont donc été discuté dans la discussion de la première étude 6.3.2.4.

Le seul effet de temps de présentation observé sur cette onde concerne sa latence étant donnée qu'elle est plus précoce à 101 ms. Un effet similaire était mis en évidence par Martin (2005). La latence de l'onde P300 est connue pour refléter le temps de catégorisation du stimulus traité (Kutas et coll. 1977, Polich 1986). Nos résultats soulignent donc que la catégorisation se fait plus rapidement quand le stimulus est présenté plus longtemps. Cet effet peut s'expliquer, entre autre, par le fait que les effets « top-down » facilitateurs sont plus importants pour un temps de présentation plus long et entraînent dès lors un temps de catégorisation plus court.





# DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

## 8

Dans ce travail, nous cherchions à préciser les processus d'identification de lettres chez des enfants normo-lecteurs et dyslexiques en utilisant une tâche de choix forcé dans des mots et des non-mots. Le décours temporel était observé par la technique des potentiels évoqués pour voir à quel moment du traitement les influences lexicales et de position intervenaient.

Les différents résultats des deux expériences ont été discutés séparément mais il est important de revenir ici sur les conclusions des deux études mais également sur les limitations de cette étude et les pistes pour évoluer dans la compréhension de ces mécanismes d'identification de lettres.

Les deux expériences proposées à des groupes d'enfants différents étaient identiques excepté au niveau du temps de présentation qui a été rallongé dans la seconde expérience étant donné le faible taux de bonnes réponses dans certaines conditions de la première expérience. Cette mesure d'allongement de temps de présentation ne s'est toutefois pas révélée suffisante pour pallier ce problème. Il est étonnant de voir la difficulté rencontrée par les enfants dans cette tâche qui est par ailleurs bien réussie par les adultes pour des temps de présentation beaucoup plus court dans l'étude de Martin (2005). Il est toutefois important de préciser une différence entre son étude et la nôtre concernant le paradigme expérimental. En effet, alors que dans sa tâche, le stimulus et les cibles présentées pour le choix forcé étaient présentés dans la même casse (minuscule), nous présentions les stimuli en

minuscules mais les lettres pour le choix forcé en majuscule pour « contrôler » un effet de reconnaissance basé uniquement sur les traits visuels.

Rappelons qu'au niveau comportemental, nous n'avons pas observé d'effet du temps de présentation. Les résultats des deux études mettent en évidence un effet de supériorité du mot plus important chez les normo-lecteurs que chez les dyslexiques. Nous avons postulé que cet effet était dû à une combinaison d'effets « bottom-up » de contexte orthographique, qui ne sont pas affectés chez les dyslexiques, et d'effets « top-down » lexicaux, dont l'influence seraient moindre voire absente chez les dyslexiques. Pour tester cette hypothèse, l'expérience devrait être répétée avec des pseudomots pour lesquels le contexte orthographique est présent en l'absence d'effet de lexicalité.

En ce qui concerne l'effet de position de mots, nos résultats vont à l'encontre de l'hypothèse de l'Optimal Viewing Position puisque les scores sont meilleurs en position et décroissent pour être les plus faibles en 5<sup>ième</sup> position pour les mots. Pour les non-mots, la première position est également la mieux réussie mais les résultats les plus faibles concernent la troisième position. L'effet de masquage latéral explique en partie ce profil bien que d'autres facteurs, tels que la visibilité des lettres ou le transfert hémisphérique, interviennent puisque la différence entre les première et cinquième position est significative. L'analyse des potentiels évoqués par position aurait pu nous permettre d'avancer concernant cette hypothèse mais nous disposons de trop peu de tracés valides dans certaines conditions que pour effectuer ces analyses.

Ceci nous confronte directement à la réalité de terrain. En effet, cette étude est réalisée dans le cadre plus large d'une étude européenne comportant un volet comportemental, une analyse génétique et une partie en potentiel évoqué. Les tests que nous proposons étaient donc très contraints en temps et au niveau du recrutement. Dans ce cadre, une tâche d'identification de lettres isolées étaient proposées aux enfants et l'analyse des résultats a permis de définir le temps de présentation auquel tous les enfants obtenaient 90% de réponses correctes. C'est sur base de cette épreuve que le temps de présentation de la première expérience a été défini. Lors de l'analyse des résultats, nous avons constaté que le taux de réponses correctes étaient au niveau du hasard chez les enfants dyslexiques pour certaines positions de la condition 'non-mots' et le petit nombre de réponses électrophysiologiques valides qui en résulte n'a pas permis d'effectuer toutes les analyses souhaitées.

Pour remédier à cela, nous avons proposés une expérience identique en rallongeant le temps de présentation. Il apparaît cependant que cette solution n'est pas suffi-

sante puisque les analyses comportementales de la deuxième expérience montrent des résultats similaires à la première et aucun effet du temps de présentation n'est constaté. Comme la comparaison des temps de présentation a été proposée a posteriori, les deux temps de présentation ont été proposés à des sujets différents. Les différences inter-individuelles étant très importantes dans ces habiletés, l'absence d'effet de temps de présentation doit être interprété avec prudence.

De plus, les contraintes pratiques ne nous ont pas permis d'apparier les groupes de sujets sur toutes les variables pouvant intervenir. Il aurait en effet été intéressant de pouvoir comparer des groupes de sujet normo-lecteurs et dyslexiques appariés en âge d'une part et en niveau de lecture d'autre part. Une analyse en fonction du type de déficit des dyslexiques seraient également judicieuses. Il serait intéressant de contrôler le niveau de lecture en fonction du type de stimuli, les compétences aux tâches visuo-attentionnelles, les habiletés phonologiques, les tâches de mémoire de travail, etc.

Par ailleurs, les études que nous venons de présenter avaient pour objectif de voir à quel phase du traitement d'identification de la lettre interviennent les influences « top-down » lexicales. Nous avons analysé ces processus chez des enfants normo-lecteurs et chez des enfants dyslexiques. Mais bien que la dyslexie développementale ait permis de nombreuses avancées dans la compréhension des mécanismes de lecture et de leur mise en place, elle n'est pas la seule pathologie dans laquelle des difficultés de lecture sont observées. Ainsi, dans la neurofibromatose de type 1, plusieurs auteurs ont souligné des difficultés similaires aux dyslexiques avec cependant des divergences sur certains points et en fonction des études. Aucune recherche à notre connaissance ne s'est intéressée à l'empan visuo-attentionnel chez ces enfants mais une étude est actuellement en cours pour permettre de spécifier le profil de ces enfants tant au niveau de la lecture, de la phonologie, des traitements visuo-spatiaux, de l'attention et de l'empan visuo-attentionnel. Il serait par ailleurs intéressant de proposer notre protocole à des enfants souffrant de NF1.



# BIBLIOGRAPHIE

- Abdullaev, Y. G. et Bechtereva, N. P. Neuronal correlate of the higher-order semantic code in human prefrontal cortex in language tasks. *Int J Psychophysiol*, 14 : 167–177, May 1993. (Cité page 73.)
- Abdullaev, Y. G. et Posner, M. I. Event-related brain potential imaging of semantic encoding during processing single words. *Neuroimage*, 7 :1–13, Jan 1998. (Cité page 73.)
- Adams, M. Models of word recognition. *Cognitive Psychology*, 11 :133–176, 1979. (Cité page 19.)
- Aghababian, V. et Nazir, T. A. Developing normal reading skills : aspects of the visual processes underlying word recognition. *J Exp Child Psychol*, 76 :123–150, Jun 2000. (Cité page 126.)
- Ahissar, M., Protopapas, A., Reid, M., et Merzenich, M. M. Auditory processing parallels reading abilities in adults. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 97 :6832–6837, Jun 2000. (Cité page 93.)
- Alexander, M. P., Hiltbrunner, B., et Fischer, R. S. Distributed anatomy of transcortical sensory aphasia. *Arch. Neurol.*, 46 :885–892, Aug 1989. (Cité page 52.)
- Allen, P. A., Wallace, B., et Weber, T. A. Influence of case type, word frequency, and exposure duration on visual word recognition. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21 :914–934, 1995. (Cité pages 19 et 21.)
- Amitay, S., Ben-Yehudah, G., Banai, K., et Ahissar, M. Disabled readers suffer from visual and auditory impairments but not from a specific magnocellular deficit. *Brain*, 125 :2272–2285, Oct 2002. (Cité page 110.)
- Andrews, W., Barber, M., Hernandez-Miranda, L. R., Xian, J., Rakic, S., Sundaresan, V., Rabbitts, T. H., Pannell, R., Rabbitts, P., Thompson, H., Erskine, L., Murakami,

- F., et Parnavelas, J. G. The role of Slit-Robo signaling in the generation, migration and morphological differentiation of cortical interneurons. *Dev. Biol.*, 313 :648–658, Jan 2008. (Cité page 113.)
- Andrews, W., Liapi, A., Plachez, C., Camurri, L., Zhang, J., Mori, S., Murakami, F., Parnavelas, J. G., Sundaresan, V., et Richards, L. J. Robo1 regulates the development of major axon tracts and interneuron migration in the forebrain. *Development*, 133 :2243–2252, Jun 2006. (Cité page 113.)
- Ans, B., Carbonnel, S., et Valdois, S. A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychol Rev*, 105 :678–723, Oct 1998. (Cité pages 48 et 101.)
- Anstis, S. M. Letter : A chart demonstrating variations in acuity with retinal position. *Vision Res.*, 14 :589–592, Jul 1974. (Cité page 32.)
- Arroyo, S., Lesser, R. P., Poon, W. T., Webber, W. R., et Gordon, B. Neuronal generators of visual evoked potentials in humans : visual processing in the human cortex. *Epilepsia*, 38 :600–610, May 1997. (Cité page 153.)
- Baddeley, A. *Working Memory*. Oxford University Press, Oxford, 1986. (Cité pages 63 et 88.)
- Bannatyne, A. et Money, J. *The Disabled Reader : Education of the Dyslexic Child*. The Johns Hopkins Press, Baltimore, 1966. (Cité page 83.)
- Barde, L. H. et Thompson-Schill, S. L. Models of functional organization of the lateral prefrontal cortex in verbal working memory : evidence in favor of the process model. *J Cogn Neurosci*, 14 :1054–1063, Oct 2002. (Cité page 66.)
- Baron, J. et Thurston, I. An analysis of the word superiority effect. *Cognitive Psychology*, 4 :207–228, 1973. (Cité page 36.)
- Bavelier, D., Corina, D., Jezzard, P., Padmanabhan, S., Prinster, A., et Braun, A. Sentence reading : a functional MRI study at 4 tesla. *J Cogn Neurosci*, 9 :664–686, 1997. (Cité page 65.)
- Beaulieu, C., Plewes, C., Paulson, L. A., Roy, D., Snook, L., Concha, L., et Phillips, L. Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability. *Neuroimage*, 25 :1266–1271, May 2005. (Cité page 108.)

- Beauregard, M., Chertkow, H., Bub, D., Murtha, S., Dixon, R., et Evans, A. The neural substrate for concrete, abstract, and emotional word lexica : a positron emission tomography study. *J Cogn Neurosci*, 9 :441–461, 1997. (Cité page 65.)
- Beauvois, M. F. et Déroutesné, J. Phonological alexia : three dissociations. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatr.*, 42 :1115–1124, Dec 1979. (Cité pages 39 et 52.)
- Bednarek, D. B. et Grabowska, A. Luminance and chromatic contrast sensitivity in dyslexia : the magnocellular deficit hypothesis revisited. *Neuroreport*, 13 :2521–2525, Dec 2002. (Cité page 110.)
- Belin, P., Zatorre, R. J., Lafaille, P., Ahad, P., et Pike, B. Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature*, 403 :309–312, Jan 2000. (Cité page 62.)
- Bentin, S., Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M. H., Echallier, J. F., et Pernier, J. ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels : time course and scalp distribution. *J Cogn Neurosci*, 11 :235–260, May 1999. (Cité pages 72, 140 et 160.)
- Besson, M. et Macar, F. Visual and auditory event-related potentials elicited by linguistic and non-linguistic incongruities. *Neurosci. Lett.*, 63 :109–114, Jan 1986. (Cité page 73.)
- Billingsley, R. L., Jackson, E. F., Slopis, J. M., Swank, P. R., Mahankali, S., et Moore, B. D. Functional magnetic resonance imaging of phonologic processing in neurofibromatosis 1. *J. Child Neurol.*, 18 :731–740, Nov 2003. (Cité page 117.)
- Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S., Springer, J. A., Kaufman, J. N., et Possing, E. T. Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cereb. Cortex*, 10 :512–528, May 2000. (Cité pages 62 et 63.)
- Binder, J. R., McKiernan, K. A., Parsons, M. E., Westbury, C. F., Possing, E. T., Kaufman, J. N., et Buchanan, L. Neural correlates of lexical access during visual word recognition. *J Cogn Neurosci*, 15 :372–393, Apr 2003. (Cité pages 60 et 61.)
- Bischoff-Grethe, A., Proper, S. M., Mao, H., Daniels, K. A., et Berns, G. S. Conscious and unconscious processing of nonverbal predictability in Wernicke's area. *J. Neurosci.*, 20 :1975–1981, Mar 2000. (Cité page 64.)

- Bishop, D. V., Bishop, S. J., Bright, P., James, C., Delaney, T., et Tallal, P. Different origin of auditory and phonological processing problems in children with language impairment : evidence from a twin study. *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 42 : 155–168, Feb 1999. (Cité page 105.)
- Bishop, D. V. et Snowling, M. J. Developmental dyslexia and specific language impairment : same or different? *Psychol Bull*, 130 :858–886, Nov 2004. (Cité page 87.)
- Bonmassar, G., Schwartz, D. P., Liu, A. K., Kwong, K. K., Dale, A. M., et Belliveau, J. W. Spatiotemporal brain imaging of visual-evoked activity using interleaved EEG and fMRI recordings. *Neuroimage*, 13 :1035–1043, Jun 2001. (Cité page 153.)
- Bosse, M. L., Tainturier, M. J., et Valdois, S. Developmental dyslexia : the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104 :198–230, Aug 2007. (Cité pages 84, 101 et 102.)
- Bottini, G., Corcoran, R., Sterzi, R., Paulesu, E., Schenone, P., Scarpa, P., Frackowiak, R. S., et Frith, C. D. The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A positron emission tomography activation study. *Brain*, 117 ( Pt 6) :1241–1253, Dec 1994. (Cité page 65.)
- Bouma, H. Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226 :177–178, Apr 1970. (Cité page 32.)
- Bouma, H. Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Res.*, 13 :767–782, Apr 1973. (Cité pages 34 et 157.)
- Bowers, J. S. In defense of abstractionist theories of repetition priming and word identification. *Psychon Bull Rev*, 7 :83–99, Mar 2000. (Cité page 23.)
- Braun, M., Hutzler, F., Ziegler, J. C., Dambacher, M., et Jacobs, A. M. Pseudohomophone effects provide evidence of early lexico-phonological processing in visual word recognition. *Hum Brain Mapp*, 30 :1977–1989, Jul 2009. (Cité page 71.)
- Brem, S., Halder, P., Bucher, K., Summers, P., Martin, E., et Brandeis, D. Tuning of the visual word processing system : distinct developmental ERP and fMRI effects. *Hum Brain Mapp*, 30 :1833–1844, Jun 2009. (Cité page 160.)
- Breton, S. et Léger, F. *Mon cerveau ne m'écoute pas. Comprendre et aider l'enfant dyspraxique*. Editions du CHU Sainte-Justine, Montréal, 2007. (Cité page 88.)



- Broca, P. Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé ; suivies d'une observation d'aphemie. *Bulletin de la société anatomique de Paris*, 6 :330–357, 1861. (Cité page 50.)
- Brown, W. S., Bjerke, M. D., et Galbraith, G. C. Interhemispheric transfer in normals and acallosals : latency adjusted evoked potential averaging. *Cortex*, 34 :677–692, Dec 1998. (Cité page 162.)
- Brunswick, N., McCrory, E., Price, C. J., Frith, C. D., et Frith, U. Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics : A search for Wernicke's Wortschatz ? *Brain*, 122 ( Pt 10) :1901–1917, Oct 1999. (Cité pages 65, 109 et 110.)
- Brysbaert, M. Interhemispheric transfer and the processing of foveally presented stimuli. *Behav. Brain Res.*, 64 :151–161, Oct 1994. (Cité pages 34 et 162.)
- Brysbaert, M. The importance of interhemispheric transfer for foveal vision : a factor that has been overlooked in theories of visual word recognition and object perception. *Brain Lang*, 88 :259–267, Mar 2004. (Cité page 34.)
- Brysbaert, M. et Nazir, T. Visual constraints in written word recognition :Evidence from the optimal viewing-position effect. *Journal of Research in Reading*, 28 :216–228, 2005. (Cité page 126.)
- Bullier, J. Integrated model of visual processing. *Brain Res. Brain Res. Rev.*, 36 : 96–107, Oct 2001. (Cité page 123.)
- Burbridge, T. J., Wang, Y., Volz, A. J., Peschansky, V. J., Lisann, L., Galaburda, A. M., Lo Turco, J. J., et Rosen, G. D. Postnatal analysis of the effect of embryonic knockdown and overexpression of candidate dyslexia susceptibility gene homolog Dcdc2 in the rat. *Neuroscience*, 152 :723–733, Mar 2008. (Cité page 113.)
- Caramazza, A. et Hillis, A. E. Spatial representation of words in the brain implied by studies of a unilateral neglect patient. *Nature*, 346 :267–269, Jul 1990. (Cité page 22.)
- Carr, T. H., Davidson, B. J., et Hawkins, H. L. Perceptual flexibility in word recognition : strategies affect orthographic computation but not lexical access. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 4 :674–690, Nov 1978. (Cité page 36.)

- Castles, A., Holmes, V. M., Neath, J., et Kinoshita, S. How does orthographic knowledge influence performance on phonological awareness tasks? *Q J Exp Psychol A*, 56 :445–467, Apr 2003. (Cité page 81.)
- Cattell, J. The time taken up by cerebral operation. *Mind*, 11 :220–242, 1886. (Cité pages 19 et 35.)
- Celsis, P., Boulanouar, K., Doyon, B., Ranjeva, J. P., Berry, I., Nespoulous, J. L., et Chollet, F. Differential fMRI responses in the left posterior superior temporal gyrus and left supramarginal gyrus to habituation and change detection in syllables and tones. *Neuroimage*, 9 :135–144, Jan 1999. (Cité page 64.)
- Cestnick, L. et Coltheart, M. The relationship between language-processing and visual-processing deficits in developmental dyslexia. *Cognition*, 71 :231–255, Jul 1999. (Cité pages 98 et 106.)
- Chase, C. H. et Tallal, P. A developmental, interactive activation model of the word superiority effect. *J Exp Child Psychol*, 49 :448–487, Jun 1990. (Cité page 124.)
- Cheminal, R. Les dyslexies : aspects cliniques. Dans Cheminal, R. et Brun, V., éditeurs, *Les dyslexies*. Masson, Paris, 2002. (Cité pages 87 et 88.)
- Clements-Stephens, A. M., Rimrodt, S. L., Gaur, P., et Cutting, L. E. Visuospatial processing in children with neurofibromatosis type 1. *Neuropsychologia*, 46 :690–697, Jan 2008. (Cité page 117.)
- Coch, D., Hart, T., et Mitra, P. Three kinds of rhymes : An ERP study. *Brain Lang*, 104 :230–243, Mar 2008. (Cité page 72.)
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., et Michel, F. The visual word form area : spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123 ( Pt 2) :291–307, Feb 2000. (Cité pages 70, 128 et 161.)
- Cohen, L., Lehéricy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., et Dehaene, S. Language-specific tuning of visual cortex ? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, 125 :1054–1069, May 2002. (Cité page 70.)
- Coltheart, M. Lexical access in simple reading tasks. Dans Underwood, G., éditeur, *Strategies of information processing*. New York : Academic Press, London, 1978. (Cité pages 40 et 119.)

- Coltheart, M., Patterson, K., et Marshall, J. C. *Deep dyslexia*. Routledge and K. Paul, London, 1980. (Cité pages 8 et 40.)
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., et Ziegler, J. DRC : a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev*, 108 : 204–256, Jan 2001. (Cité pages 8, 24, 26, 41, 42 et 46.)
- Comerchero, M. D. et Polich, J. P3a, perceptual distinctiveness, and stimulus modality. *Brain Res Cogn Brain Res*, 7 :41–48, Jul 1998. (Cité page 72.)
- Consortium, I. H. G. S. Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431 :931–945, Oct 2004. (Cité page 112.)
- Cornelissen, P., Richardson, A., Mason, A., Fowler, S., et Stein, J. Contrast sensitivity and coherent motion detection measured at photopic luminance levels in dyslexics and controls. *Vision Res.*, 35 :1483–1494, May 1995. (Cité page 97.)
- Cornelissen, P., Tarkiainen, A., Helenius, P., et Salmelin, R. Cortical effects of shifting letter position in letter strings of varying length. *J Cogn Neurosci*, 15 :731–746, Jul 2003. (Cité pages 59, 70 et 140.)
- Cunningham, J., Nicol, T., Zecker, S. G., Bradlow, A., et Kraus, N. Neurobiologic responses to speech in noise in children with learning problems : deficits and strategies for improvement. *Clin Neurophysiol*, 112 :758–767, May 2001. (Cité page 100.)
- Cutting, L. E., Koth, C. W., et Denckla, M. B. How children with neurofibromatosis type 1 differ from "typical" learning disabled clinic attenders : nonverbal learning disabilities revisited. *Dev Neuropsychol*, 17 :29–47, 2000. (Cité pages 117 et 118.)
- Cuvellier, J. C., Pandit, F., Casalis, S., Lemaître, M. P., et Cuisset, J. M. Analyse d'une population de 100 enfants adressés pour troubles d'apprentissage scolaire. *Archives de Pédiatrie*, 11 :201–206, 2004. (Cité page 87.)
- Daffaure, V., De Martino, S., Chauvin, C., Cay-Maubuisson, M., Camps, R., Giraud, K., Rey, V., et Habib, M. Dyslexie de Développement et Trouble Temporel : De la Perception Auditive à la Perception du Temps Conventionnel. *Rev. Neuropsychol.*, 11 :115–116, 2001. (Cité page 106.)
- Damasio, A. R. et Damasio, H. The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*, 33 : 1573–1583, Dec 1983. (Cité page 51.)

- Dapretto, M. et Bookheimer, S. Y. Form and content : dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron*, 24 :427–432, Oct 1999. (Cité page 66.)
- Davis, C. J. et Bowers, J. S. Contrasting five different theories of letter position coding : evidence from orthographic similarity effects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 32 :535–557, Jun 2006. (Cité page 26.)
- DE QUIROS, J. B. DYSPHASIA AND DYSLEXIA IN SCHOOL CHILDREN. *Folia Phoniatr (Basel)*, 16 :201–222, 1964. (Cité page 83.)
- DeFries, J. C., Fulker, D. W., et LaBuda, M. C. Evidence for a genetic aetiology in reading disability of twins. *Nature*, 329 :537–539, 1987. (Cité page 112.)
- Deltour, J.-J. *Test de closure grammaticale (révisé)*. EAP, Paris, 1998. (Cité page 141.)
- Demonet, J. F., Fiez, J. A., Paulesu, E., Petersen, S. E., et Zatorre, R. J. PET Studies of Phonological Processing : A Critical Reply to Poeppel. *Brain Lang*, 55 :352–379, Dec 1996. (Cité page 110.)
- Denckla, M. Neurofibromatosis type 1 : a model for the pathogenesis of reading disabilities. *Ment Retard Dev Disabil Res Rev*, 2 :48–53, 1996. (Cité page 118.)
- Descheemaeker, M. J., Ghesquiere, P., Symons, H., Fryns, J. P., et Legius, E. Behavioural, academic and neuropsychological profile of normally gifted Neurofibromatosis type 1 children. *J Intellect Disabil Res*, 49 :33–46, Jan 2005. (Cité pages 117 et 119.)
- Deubel, H. Separate adaptive mechanisms for the control of reactive and volitional saccadic eye movements. *Vision Res.*, 35 :3529–3540, Dec 1995. (Cité page 29.)
- Deutsch, G. K., Dougherty, R. F., Bammer, R., Siok, W. T., Gabrieli, J. D., et Wandell, B. Children's reading performance is correlated with white matter structure measured by diffusion tensor imaging. *Cortex*, 41 :354–363, Jun 2005. (Cité page 108.)
- Devlin, J. T., Matthews, P. M., et Rushworth, M. F. Semantic processing in the left inferior prefrontal cortex : a combined functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study. *J Cogn Neurosci*, 15 :71–84, Jan 2003. (Cité page 66.)

- Dilts, C. V., Carey, J. C., Kircher, J. C., Hoffman, R. O., Creel, D., Ward, K., Clark, E., et Leonard, C. O. Children and adolescents with neurofibromatosis 1 : a behavioral phenotype. *J Dev Behav Pediatr*, 17 :229–239, Aug 1996. (Cité page 118.)
- Déjerine, J. Sur un cas de cécité verbale avec agraphie suivi d'autopsie. *Mém Soc Biol*, 3 :197–201, 1891. (Cité page 51.)
- Déjerine, J. Contribution à l'étude anatomo-clinique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mém Soc Biol*, 4 :61–90, 1892. (Cité page 52.)
- Démonet, J. F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J. L., Wise, R., Rascol, A., et Frackowiak, R. The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115 ( Pt 6) :1753–1768, Dec 1992. (Cité pages 62, 65 et 110.)
- Démonet, J. F., Taylor, M. J., et Chaix, Y. Developmental dyslexia. *Lancet*, 363 : 1451–1460, May 2004. (Cité pages 89, 91, 95, 104 et 110.)
- Donchin, E., Miller, G. A., et Farwell, L. A. The endogenous components of the event-related potential—a diagnostic tool? *Prog. Brain Res.*, 70 :87–102, 1986. (Cité pages 72 et 162.)
- Déroutesné, J. et Beauvois, M. F. Phonological processing in reading : data from alexia. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatr.*, 42 :1125–1132, Dec 1979. (Cité page 52.)
- Ducrot, S., Lété, B., Sprenger-Charolles, L., Pynte, J., et Billard, C. The Optimal Viewing Position effect in beginning and dyslexic readers. *Current Psychology*, 10 :1–10, 2003. (Cité pages 126 et 156.)
- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., et Démonet, J. F. Top-down processes during auditory phoneme categorization in dyslexia : a PET study. *Neuroimage*, 34 :1692–1707, Feb 2007. (Cité pages 93 et 95.)
- Dunn, L., Theriault-Whalen, C., et Dunn, L. *Echelle de vocabulaire en images peabody. Adaptation française du Peabody Picture Vocabulary test-revised*. PSYCAN, Toronto, 1993. (Cité page 141.)
- Eckert, M. A., Leonard, C. M., Richards, T. L., Aylward, E. H., Thomson, J., et Benninger, V. W. Anatomical correlates of dyslexia : frontal and cerebellar findings. *Brain*, 126 :482–494, Feb 2003. (Cité page 111.)

- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M., et Zeffiro, T. A. The visual deficit theory of developmental dyslexia. *Neuroimage*, 4 :S108–117, Dec 1996. (Cité page 110.)
- Ehri, L. C. Phases of acquisition in learning to read words and implications for teaching. *British Journal of Educational Psychology : Monograph Series*, 1 :7–28, 2002. (Cité pages 78 et 96.)
- Ehri, L. Grapheme-phoneme knowledge is essential for learning to read words in english. Dans Metsala, J., Marshall, J., et Ehri, L., éditeurs, *Word recognition in beginning literacy*. Erlbaum, Mahwah, NJ, 1998. (Cité page 78.)
- Ehri, L. Reading development and the teaching of reading. Dans Oakhill, J. et Beard, R., éditeurs, *Reading development and the teaching of reading*. Blackwell, Oxford, 1999. (Cité page 78.)
- Eldridge, R., Denckla, M. B., Bien, E., Myers, S., Kaiser-Kupfer, M. I., Pikus, A., Schlesinger, S. L., Parry, D. M., Dambrosia, J. M., et Zasloff, M. A. Neurofibromatosis type 1 (Recklinghausen's disease). Neurologic and cognitive assessment with sibling controls. *Am. J. Dis. Child.*, 143 :833–837, Jul 1989. (Cité page 119.)
- Eliason, M. J. Neurofibromatosis : implications for learning and behavior. *J Dev Behav Pediatr*, 7 :175–179, Jun 1986. (Cité page 117.)
- Eliason, M. J. Neuropsychological patterns : neurofibromatosis compared to developmental learning disorders. *Neurofibromatosis*, 1 :17–25, 1988. (Cité page 117.)
- Escera, C., Alho, K., Winkler, I., et Näätänen, R. Neural mechanisms of involuntary attention to acoustic novelty and change. *J Cogn Neurosci*, 10 :590–604, Sep 1998. (Cité page 72.)
- Evrard, P., Miladi, N., Bonnier, C., et Gressens, P. Normal and abnormal development of the brain. Dans Rapin, I. et Segalowitz, S., éditeurs, *Child Neuropsychology*, pages 11–44. Elsevier Science publishers, Amsterdam, 1989. (Cité page 107.)
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., et Molteni, M. Visual and auditory attentional capture are both sluggish in children with developmental dyslexia. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*, 65 :61–72, 2005. (Cité page 100.)
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R., et Mascetti, G. G. The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain Cogn*, 53 :181–184, Nov 2003. (Cité page 99.)

- Facoetti, A. et Molteni, M. The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 39 :352–357, 2001. (Cité page 99.)
- Facoetti, A., Paganoni, P., Turatto, M., Marzola, V., et Mascetti, G. G. Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex*, 36 :109–123, Feb 2000. (Cité page 99.)
- Facoetti, A., Ruffino, M., Peru, A., Paganoni, P., et Chelazzi, L. Sluggish engagement and disengagement of non-spatial attention in dyslexic children. *Cortex*, 44 :1221–1233, Oct 2008. (Cité page 100.)
- Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., Molteni, M., et Zorzi, M. Multisensory Spatial Attention Deficits Are Predictive of Phonological Decoding Skills in Developmental Dyslexia. *J Cogn Neurosci*, Apr 2009. (Cité page 100.)
- Farid, M. et Grainger, J. How initial fixation position influences visual word recognition : a comparison of French and Arabic. *Brain Lang*, 53 :351–368, Jun 1996. (Cité page 33.)
- Fawcett, A. J. et Nicolson, R. I. Performance of Dyslexic Children on Cerebellar and Cognitive Tests. *J Mot Behav*, 31 :68–78, Mar 1999. (Cité page 103.)
- Ferrand, L. *Psychologie cognitive de la lecture. Reconnaissance des mots écrit chez l'adulte*. De Boeck Université, Bruxelles, 2007. (Cité pages 20, 23, 24, 25, 26 et 36.)
- Fiebach, C. J., Friederici, A. D., Müller, K., et von Cramon, D. Y. fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J Cogn Neurosci*, 14 : 11–23, Jan 2002. (Cité pages 60, 61, 70 et 71.)
- Fiez, J. A. et Petersen, S. E. Neuroimaging studies of word reading. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 95 :914–921, Feb 1998. (Cité page 63.)
- Fisher, S. E. et DeFries, J. C. Developmental dyslexia : genetic dissection of a complex cognitive trait. *Nat. Rev. Neurosci.*, 3 :767–780, Oct 2002. (Cité page 113.)
- Forster, K. I. et Chambers, S. M. Lexical Access and Naming Time. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12 :627–635, 1973. (Cité pages 39 et 43.)
- Fosker, T. et Thierry, G. Phonological oddballs in the focus of attention elicit a normal P3b in dyslexic adults. *Brain Res Cogn Brain Res*, 24 :467–475, Aug 2005. (Cité page 72.)

- Fox, P. T. et Raichle, M. E. Stimulus rate determines regional brain blood flow in striate cortex. *Ann. Neurol.*, 17 :303–305, Mar 1985. (Cité page 59.)
- Friederici, A. D. Event-related brain potential studies in language. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 4 :466–470, Nov 2004. (Cité page 73.)
- Friederici, A. D. et Kotz, S. A. The brain basis of syntactic processes : functional imaging and lesion studies. *Neuroimage*, 20 Suppl 1 :8–17, Nov 2003. (Cité page 66.)
- Friederici, A. D., Pfeifer, E., et Hahne, A. Event-related brain potentials during natural speech processing : effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Brain Res Cogn Brain Res*, 1 :183–192, Oct 1993. (Cité page 73.)
- Frith, U. Beneath the surface of developmental dyslexia. Dans Patterson, K., Marshall, J., et Coltheart, M., éditeurs, *Surface Dyslexia*. Erlbaum, London, 1985. (Cité pages 76 et 79.)
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., et Geschwind, N. Developmental dyslexia : four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann. Neurol.*, 18 :222–233, Aug 1985. (Cité pages 108 et 114.)
- Garrett, A. S., Flowers, D. L., Absher, J. R., Fahey, F. H., Gage, H. D., Keyes, J. W., Porrino, L. J., et Wood, F. B. Cortical activity related to accuracy of letter recognition. *Neuroimage*, 11 :111–123, Feb 2000. (Cité page 60.)
- Geschwind, N. Disconnexion syndromes in animals and man. I. *Brain*, 88 :237–294, Jun 1965. (Cité page 52.)
- Geschwind, N., Galaburda, A., et LeMay, M. Morphological and physiological substrates of language and cognitive development. *Res Publ Assoc Res Nerv Ment Dis*, 57 :31–41, 1979. (Cité page 107.)
- Gold, B. T. et Buckner, R. L. Common prefrontal regions coactivate with dissociable posterior regions during controlled semantic and phonological tasks. *Neuron*, 35 :803–812, Aug 2002. (Cité page 66.)
- Gorno-Tempini, M. L. et Price, C. J. Identification of famous faces and buildings : a functional neuroimaging study of semantically unique items. *Brain*, 124 :2087–2097, Oct 2001. (Cité page 65.)



- Grainger, J., Bouttevin, S., Truc, C., Bastien, M., et Ziegler, J. Word superiority, pseudoword superiority, and learning to read : a comparison of dyslexic and normal readers. *Brain Lang*, 87 :432–440, Dec 2003. (Cité pages 155 et 158.)
- Grainger, J. et Ferrand, L. Phonology and orthography in visual word recognition : Effects of masked homophones primes. *Journal of Memory and Language*, 33 :218–233, 1994. (Cité page 36.)
- Grainger, J. et Jacobs, A. M. A dual read-out model of word context effects in letter perception : Further investigations of the word superiority effect. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20 :1150–1176, 1994. (Cité pages 36 et 37.)
- Grainger, J. et Jacobs, A. M. Orthographic processing in visual word recognition : a multiple read-out model. *Psychol Rev*, 103 :518–565, Jul 1996. (Cité pages 23 et 26.)
- Grainger, J., Kiyonaga, K., et Holcomb, P. J. The time course of orthographic and phonological code activation. *Psychol Sci*, 17 :1021–1026, Dec 2006. (Cité page 71.)
- Grainger, J. et Van Heuven, W. Modelling letter position coding in printed word perception. Dans Bonin, P., éditeur, *The mental lexicon*, pages 2–23. Nova Science, New York, 2003. (Cité pages 25, 123 et 125.)
- Grigorenko, E. L. The first candidate gene for dyslexia : Turning the page of a new chapter of research. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 100 :11190–11192, Sep 2003. (Cité page 113.)
- Gross-Glenn, K. et Rothenberg, S. Evidence for deficit in interhemispheric transfer of information in dyslexic boys. *Int. J. Neurosci.*, 24 :23–35, Aug 1984. (Cité page 108.)
- Grossi, G., Coch, D., Coffey-Corina, S., Holcomb, P. J., et Neville, H. J. Phonological processing in visual rhyming : a developmental erp study. *J Cogn Neurosci*, 13 : 610–625, Jul 2001. (Cité page 71.)
- Haber, L., Haber, R., et Furlin, K. Word length and word shape as sources of information in reading. *Reading Research Quartely*, 18 :165–189, 1983. (Cité page 19.)
- Habib, M. *La dyslexie à livre ouvert*. Résodys, Marseille, 2003. (Cité pages 86, 87 et 88.)

- Hachon, C., Iannuzzi, S., et Chaix, Y. Behavioural and cognitive phenotypes in children with neurofibromatosis type 1 (NF1 : The link with the neurobiological level. *Brain Dev*, January 2010. (Cité page 115.)
- Hagoort, P., Wassenaar, M., et Brown, C. M. Syntax-related ERP-effects in Dutch. *Brain Res Cogn Brain Res*, 16 :38–50, Mar 2003. (Cité page 73.)
- Halit, H., de Haan, M., et Johnson, M. H. Modulation of event-related potentials by prototypical and atypical faces. *Neuroreport*, 11 :1871–1875, Jun 2000. (Cité page 69.)
- Hallgren, B. Specific dyslexia (congenital word-blindness); a clinical and genetic study. *Acta Psychiatr Neurol Suppl*, 65 :1–287, 1950. (Cité page 111.)
- Hari, R., Renvall, H., et Tanskanen, T. Left minineglect in dyslexic adults. *Brain*, 124 :1373–1380, Jul 2001. (Cité pages 99 et 100.)
- Hari, R., Valta, M., et Uutela, K. Prolonged attentional dwell time in dyslexic adults. *Neurosci. Lett.*, 271 :202–204, Aug 1999. (Cité page 99.)
- Harm, M. W. et Seidenberg, M. S. Computing the meanings of words in reading : cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychol Rev*, 111 :662–720, Jul 2004. (Cité pages 42 et 45.)
- Hart, J. et Gordon, B. Delineation of single-word semantic comprehension deficits in aphasia, with anatomical correlation. *Ann. Neurol.*, 27 :226–231, Mar 1990. (Cité page 52.)
- Hauk, O., Patterson, K., Woollams, A., Watling, L., Pulvermüller, F., et Rogers, T. T. [Q :] When would you prefer a SOSSAGE to a SAUSAGE ? [A :] At about 100 msec. ERP correlates of orthographic typicality and lexicality in written word recognition. *J Cogn Neurosci*, 18 :818–832, May 2006. (Cité pages 66, 69 et 181.)
- Healy, A. F. et Cunningham, T. F. A developmental evaluation of the role of word shape in word recognition. *Mem Cognit*, 20 :141–150, Mar 1992. (Cité pages 19, 20 et 21.)
- Heiervang, E., Stevenson, J., et Hugdahl, K. Auditory processing in children with dyslexia. *J Child Psychol Psychiatry*, 43 :931–938, Oct 2002. (Cité page 105.)

- Helenius, P., Tarkiainen, A., Cornelissen, P., Hansen, P. C., et Salmelin, R. Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cereb. Cortex*, 9 :476–483, 1999. (Cité page 59.)
- Herbster, A. N., Mintun, M. A., Nebes, R. D., et Becker, J. T. Regional cerebral blood flow during word and nonword reading. *Hum Brain Mapp*, 5 :84–92, 1997. (Cité pages 62 et 65.)
- Hillis, A. E. et Caramazza, A. Deficit to stimulus-centered, letter shape representations in a case of "unilateral neglect". *Neuropsychologia*, 29 :1223–1240, 1991. (Cité page 53.)
- Hinshelwood, J. *Congenital word-blindness*. Lewis, London, 1917. (Cité page 107.)
- Hofman, K. J., Harris, E. L., Bryan, R. N., et Denckla, M. B. Neurofibromatosis type 1 : the cognitive phenotype. *J. Pediatr.*, 124 :1–8, Apr 1994. (Cité pages 117 et 118.)
- Holcomb, P. J. et Grainger, J. On the time course of visual word recognition : an event-related potential investigation using masked repetition priming. *J Cogn Neurosci*, 18 :1631–1643, Oct 2006. (Cité page 71.)
- Holmes, V. et O'Regan, J. K. Reading derivationally affixed French words. *Language and Cognitive Processes*, 7 :163–192, 1992. (Cité page 33.)
- Holroyd, C. B. et Coles, M. G. The neural basis of human error processing : reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 109 : 679–709, Oct 2002. (Cité page 73.)
- Horwitz, B., Rumsey, J. M., et Donohue, B. C. Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 95 :8939–8944, Jul 1998. (Cité page 109.)
- Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W. D., Friston, K., Weiller, C., et Frackowiak, R. The cortical localization of the lexicons. Positron emission tomography evidence. *Brain*, 115 ( Pt 6) :1769–1782, Dec 1992. (Cité pages 59 et 65.)
- Huey, E. *The Psychology and Pedagogy of Reading*. MIT Press, Cambridge, MA, 1908. (Cité page 27.)
- Humphreys, G. W., Riddoch, M. J., et Price, C. J. Top-down processes in object identification : evidence from experimental psychology, neuropsychology and

- functional anatomy. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.*, 352 :1275–1282, Aug 1997. (Cité page 123.)
- Humphries, C. and Binder, J., Medler, D., et Liebenthal, E. Time course of semantic processes during sentence comprehension : An fMRI study . *Neuroimage*, 36 : 924–932, 2007. (Cité page 65.)
- Hunter, Z. R., Brysbaert, M., et Knecht, S. Foveal word reading requires inter-hemispheric communication. *J Cogn Neurosci*, 19 :1373–1387, Aug 2007. (Cité page 157.)
- Hyman, S. L., Arthur Shores, E., et North, K. N. Learning disabilities in children with neurofibromatosis type 1 : subtypes, cognitive profile, and attention-deficit-hyperactivity disorder. *Dev Med Child Neurol*, 48 :973–977, Dec 2006. (Cité page 117.)
- Hyman, S. L., Shores, A., et North, K. N. The nature and frequency of cognitive deficits in children with neurofibromatosis type 1. *Neurology*, 65 :1037–1044, Oct 2005. (Cité pages 117, 118 et 119.)
- Ikeda, M. et Saida, S. Span of recognition in reading. *Vision Res.*, 18 :83–88, 1978. (Cité page 31.)
- Iles, J., Walsh, V., et Richardson, A. Visual search performance in dyslexia. *Dyslexia*, 6 :163–177, 2000. (Cité page 99.)
- Indefrey, P., Kleinschmidt, A., Merboldt, K. D., Krüger, G., Brown, C., Hagoort, P., et Frahm, J. Equivalent responses to lexical and nonlexical visual stimuli in occipital cortex : a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage*, 5 : 78–81, Jan 1997. (Cité pages 59 et 65.)
- Ipata, A., Girelli, M., Miniussi, C., et Marzi, C. A. Interhemispheric transfer of visual information in humans : the role of different callosal channels. *Arch Ital Biol*, 135 :169–182, Mar 1997. (Cité page 162.)
- Irwin, D. E. Lexical processing during saccadic eye movements. *Cogn Psychol*, 36 : 1–27, Jun 1998. (Cité page 28.)
- Jacquier-Roux, M., Valdois, S., et Zorman, M. *Outils de dépistage des dyslexies*. Laboratoires Cogni-Sciences IUFM de Grenoble, 2002. (Cité page 141.)

- Javal, E. Sur la physiologie de la lecture. *Annales d'oculistique*, 79 :97–117, 1879. (Cité page 27.)
- Jobard, G., Crivello, F., et Tzourio-Mazoyer, N. Evaluation of the dual route theory of reading : a metanalysis of 35 neuroimaging studies. *Neuroimage*, 20 :693–712, Oct 2003. (Cité page 61.)
- Johannes, S., Kussmaul, C. L., Münte, T. F., et Mangun, G. R. Developmental dyslexia : passive visual stimulation provides no evidence for a magnocellular processing defect. *Neuropsychologia*, 34 :1123–1127, Nov 1996. (Cité page 110.)
- Johnson, N. A pattern-unit model of word identification. Dans Laberge, D. et Samuels, S., éditeurs, *Basic processes in reading : Perception and comprehension*. NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1977. (Cité page 19.)
- Johnston, J. C. et McClelland, J. L. Visual factors in word perception. *Perception and Psychophysics*, 14 :365–370, 1973. (Cité page 36.)
- Johnston, J. C. et McClelland, J. L. Perception of letters in words : seek not and ye shall find. *Science*, 184 :1192–1194, Jun 1974. (Cité page 36.)
- Johnston, J. C. et McClelland, J. L. Experimental tests of a hierarchical model of word recognition. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 19 :503–524, 1980. (Cité page 36.)
- Jordan, T. R. et Bevan, K. M. Word superiority over isolated letters : the neglected case of forward masking. *Mem Cognit*, 22 :133–144, Mar 1994. (Cité page 36.)
- Joy, P., Roberts, C., North, K., et de Silva, M. Neuropsychological function and MRI abnormalities in neurofibromatosis type 1. *Dev Med Child Neurol*, 37 :906–914, Oct 1995. (Cité page 118.)
- Katayama, J. et Polich, J. Stimulus context determines P3a and P3b. *Psychophysiology*, 35 :23–33, Jan 1998. (Cité page 72.)
- Kayl, A. E. et Moore, B. D. Behavioral phenotype of neurofibromatosis, type 1. *Ment Retard Dev Disabil Res Rev*, 6 :117–124, 2000. (Cité page 115.)
- Kertesz, A., Sheppard, A., et MacKenzie, R. Localization in transcortical sensory aphasia. *Arch. Neurol.*, 39 :475–478, Aug 1982. (Cité page 52.)

- Khateb, A., Pegna, A. J., Landis, T., Michel, C. M., Brunet, D., Seghier, M. L., et Annoni, J. M. Rhyme processing in the brain : an ERP mapping study. *Int J Psychophysiol*, 63 :240–250, Mar 2007. (Cité page 71.)
- Klingberg, T., Hedehus, M., Temple, E., Salz, T., Gabrieli, J. D., Moseley, M. E., et Poldrack, R. A. Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability : evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging. *Neuron*, 25 :493–500, Feb 2000. (Cité page 108.)
- Kramer, A. F. et Strayer, D. L. Assessing the development of automatic processing : an application of dual-task and event-related brain potential methodologies. *Biol Psychol*, 26 :231–267, Jun 1988. (Cité pages 72 et 161.)
- Kronbichler, M., Hutzler, F., Wimmer, H., Mair, A., Staffen, W., et Ladurner, G. The visual word form area and the frequency with which words are encountered : evidence from a parametric fMRI study. *Neuroimage*, 21 :946–953, Mar 2004. (Cité page 60.)
- Kuhl, P. K. Early language acquisition : cracking the speech code. *Nat. Rev. Neurosci.*, 5 :831–843, Nov 2004. (Cité page 94.)
- Kuriki, S., Takeuchi, F., et Hirata, Y. Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex. *Brain Res Cogn Brain Res*, 6 :193–203, Jan 1998. (Cité pages 69 et 124.)
- Kutas, M. Views on how the electrical activity that the brain generates reflects the functions of different language structures. *Psychophysiology*, 34 :383–398, Jul 1997. (Cité pages 70 et 73.)
- Kutas, M. et Hillyard, S. A. Event-related brain potentials to semantically inappropriate and surprisingly large words. *Biol Psychol*, 11 :99–116, Sep 1980. (Cité page 73.)
- Kutas, M., McCarthy, G., et Donchin, E. Augmenting mental chronometry : the P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197 :792–795, Aug 1977. (Cité pages 72, 161 et 183.)
- Kutas, M., Van Petten, C., et Besson, M. Event-related potential asymmetries during the reading of sentences. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 69 :218–233, Mar 1988. (Cité page 159.)

- Laasonen, M., Tomma-Halme, J., Lahti-Nuuttila, P., Service, E., et Virsu, V. Rate of information segregation in developmentally dyslexic children. *Brain Lang*, 75 : 66–81, Oct 2000. (Cité page 106.)
- LaBerge, D. et Samuels, J. Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology*, 6 :293–323, 1974. (Cité page 79.)
- Lander, E. S., Linton, L. M., Birren, B., Nusbaum, C., Zody, M. C., et al. Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409 :860–921, Feb 2001. (Cité page 112.)
- Lecocq, P. *Epreuve de Compréhension Syntaxico-Sémantique*. PU du Septentrion, Lille, 1996. (Cité page 141.)
- Lefavrais, P. Description, définition et mesure de la dyslexie. Utilisation du test L'Alouette. *Revue de Psychologie Appliquée*, 15 :33–44, 1967. (Cité pages 141 et 144.)
- Levelt, W. J. Monitoring and self-repair in speech. *Cognition*, 14 :41–104, Jul 1983. (Cité page 73.)
- Leventhal, G. Cerebral dominance and attentional bias in word recognition. *Percept Mot Skills*, 66 :791–800, Jun 1988. (Cité page 162.)
- Levi, D. M., Klein, S. A., et Aitsebaomo, A. P. Vernier acuity, crowding and cortical magnification. *Vision Res.*, 25 :963–977, 1985. (Cité page 32.)
- Levine, T. M., Materek, A., Abel, J., O'Donnell, M., et Cutting, L. E. Cognitive profile of neurofibromatosis type 1. *Semin Pediatr Neurol*, 13 :8–20, Mar 2006. (Cité page 118.)
- Levy, B. A., Bourassa, D. C., et Horn, C. Fast and slow namers : benefits of segmentation and whole word training. *J Exp Child Psychol*, 73 :115–138, Jun 1999. (Cité page 91.)
- Lichtheim, L. On aphasia. *Brain*, 7 :433–484, 1885. (Cité page 51.)
- Liebenthal, E., Binder, J. R., Spitzer, S. M., Possing, E. T., et Medler, D. A. Neural substrates of phonemic perception. *Cereb. Cortex*, 15 :1621–1631, Oct 2005. (Cité page 62.)
- Lindgren, S. D., De Renzi, E., et Richman, L. C. Cross-national comparisons of developmental dyslexia in Italy and the United States. *Child Dev*, 56 :1404–1417, Dec 1985. (Cité page 83.)

- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., et Galaburda, A. M. Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 88 :7943–7947, Sep 1991. (Cité page 97.)
- Lovegrove, W., Slaghuis, W., Bowling, A., Nelson, P., et Geeves, E. Spatial frequency processing and the prediction of reading ability : a preliminary investigation. *Percept Psychophys*, 40 :440–444, Dec 1986. (Cité page 97.)
- López-Bendito, G., Flames, N., Ma, L., Fouquet, C., Di Meglio, T., Chedotal, A., Tessier-Lavigne, M., et Marín, O. Robo1 and Robo2 cooperate to control the guidance of major axonal tracts in the mammalian forebrain. *J. Neurosci.*, 27 : 3395–3407, Mar 2007. (Cité page 113.)
- Lété, B. et Pynte, J. Word-shape and word-lexical frequency effects in lexical-decision and naming tasks. *Visual cognition*, 10 :913–948, 2003. (Cité page 21.)
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., et Colé, P. MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary-school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 36 :156–166, 2004. (Cité page 142.)
- Luo, C. R., Anderson, J. M., et Caramazza, A. Impaired stimulus-driven orienting of attention and preserved goal-directed orienting of attention in unilateral visual neglect. *Am J Psychol*, 111 :487–507, 1998. (Cité page 53.)
- Lussier, F. et Flessas, J. *Neuropsychologie de l'enfant : Troubles développementaux et de l'apprentissage*. Dunod, Paris, 2001. (Cité pages 84 et 85.)
- Mann, V. et Liberman, I. Phonological awareness and verbal short-term memory. *Journal of Learning Disabilities*, 17 :592–599, 1984. (Cité page 91.)
- Marchetti, F. M. et Mewhort, D. J. On the word-superiority effect. *Psychol Res*, 48 : 23–35, 1986. (Cité page 36.)
- Marshall, J. C. et Newcombe, F. Patterns of paralexia : a psycholinguistic approach. *J Psycholinguist Res*, 2 :175–199, Jul 1973. (Cité page 38.)
- Martin, C. D., Nazir, T., Thierry, G., Paulignan, Y., et Démonet, J. F. Perceptual and lexical effects in letter identification : an event-related potential study of the word superiority effect. *Brain Res.*, 1098 :153–160, Jul 2006. (Cité pages 36 et 70.)
- Martin, C. D., Thierry, G., Démonet, J. F., Roberts, M., et Nazir, T. ERP evidence for the split fovea theory. *Brain Res.*, 1185 :212–220, Dec 2007. (Cité page 157.)



- Martin, C. *Effets Top-down lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle : Etude en Potentiels Evoqués chez des adultes normo-lecteurs et dyslexiques*. PhD thesis, Université Lumière Lyon II, 2005. (Cité pages 123, 124, 127, 128, 139, 140, 155, 156, 159, 160, 161, 162, 165, 166, 180, 181, 182, 183 et 185.)
- Martinovic, J., Gruber, T., et Müller, M. M. Coding of visual object features and feature conjunctions in the human brain. *PLoS ONE*, 3 :e3781, 2008. (Cité page 69.)
- Masonheimer, P. E., Drum, P. A., et Ehri, L. C. Does environmental print identification lead children into word reading? *Journal of reading behavior*, 16 :257–271, 1984. (Cité page 77.)
- Martin, E. Saccadic suppression : a review and an analysis. *Psychol Bull*, 81 :899–917, Dec 1974. (Cité page 28.)
- Martin, E., Shao, K. C., et Boff, K. R. Saccadic overhead : information-processing time with and without saccades. *Percept Psychophys*, 53 :372–380, Apr 1993. (Cité page 28.)
- Mayall, K. et Humphreys, G. W. Case mixing and the task-sensitive disruption of lexical processing. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 22 :278–294, 1996. (Cité page 20.)
- Mayall, K., Humphreys, G. W., et Olson, A. Disruption to word or letter processing? The origins of case-mixing effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 23 :1275–1286, Sep 1997. (Cité page 20.)
- Mazzocco, M. M. Math learning disability and math LD subtypes : evidence from studies of Turner syndrome, fragile X syndrome, and neurofibromatosis type 1. *J Learn Disabil*, 34 :520–533, 2001. (Cité pages 118 et 119.)
- McAnally, K. I. et Stein, J. F. Auditory temporal coding in dyslexia. *Proc. Biol. Sci.*, 263 :961–965, Aug 1996. (Cité page 93.)
- McCandliss, B. D., Cohen, L., et Dehaene, S. The visual word form area : expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn. Sci. (Regul. Ed.)*, 7 :293–299, Jul 2003. (Cité pages 128 et 161.)
- McCarthy, G. et Donchin, E. A metric for thought : a comparison of P300 latency and reaction time. *Science*, 211 :77–80, Jan 1981. (Cité page 72.)

- McClelland, J. L. Preliminary letter identification in the perception of words and nonwords. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2 :80–91, 1976. (Cité pages 19 et 36.)
- McClelland, J. L. et Johnston. The role of familiar units in the perception of words and non words. *Perception and Psychophysics*, 22 :249–261, 1977. (Cité page 36.)
- McClelland, J. L. et Rumelhart, D. An interactive activation model of context effects in letter perception : Part 1. An account of basic finding. *Psychological Review*, 88 : 375–407, 1981. (Cité pages 7, 19, 22, 23, 24, 26, 36, 140 et 160.)
- McConkie, G. et Rayner, K. The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception and Psychophysics*, 17 :578–586, 1975. (Cité page 31.)
- Mechelli, A., Gorno-Tempini, M. L., et Price, C. J. Neuroimaging studies of word and pseudoword reading : consistencies, inconsistencies, and limitations. *J Cogn Neurosci*, 15 :260–271, Feb 2003. (Cité page 60.)
- Meng, H., Smith, S. D., Hager, K., Held, M., Liu, J., Olson, R. K., Pennington, B. F., DeFries, J. C., Gelernter, J., O'Reilly-Pol, T., Somlo, S., Skudlarski, P., Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Marchione, K., Wang, Y., Paramasivam, M., LoTurco, J. J., Page, G. P., et Gruen, J. R. DCDC2 is associated with reading disability and modulates neuronal development in the brain. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 102 : 17053–17058, Nov 2005. (Cité page 113.)
- Meyer, D., Schvaneveldt, R., et Ruddy, M. Functions of graphemic and phonemic codes in visual word recognition. *Memory and Cognition*, 2 :309–321, 1974. (Cité page 68.)
- Mitterer, J. O. There are at least two kinds of poor readers : whole-word poor readers and recoding poor readers. *Can J Psychol*, 36 :445–461, Sep 1982. (Cité page 83.)
- Mody, M., Studdert-Kennedy, M., et Brady, S. Speech perception deficits in poor readers : auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol*, 64 : 199–231, Feb 1997. (Cité pages 93 et 94.)
- Monk, A. F. et Hulme, C. Errors in proofreading : evidence for the use of word shape in word recognition. *Mem Cognit*, 11 :16–23, Jan 1983. (Cité pages 19 et 20.)
- Moore, C. J. et Price, C. J. Three distinct ventral occipitotemporal regions for reading and object naming. *Neuroimage*, 10 :181–192, Aug 1999. (Cité page 65.)

- Moore, L. H., Brown, W. S., Markee, T. E., Theberge, D. C., et Zvi, J. C. Bimanual coordination in dyslexic adults. *Neuropsychologia*, 33 :781–793, Jun 1995. (Cité page 108.)
- Morais, J. Constraints on the development of phonemic awareness. Dans Brady, S. et Shankweiler, D., éditeurs, *Phonological Processes in Literacy. A Tribute to Isabelle Liberman*. LEA Publishers, Hillsdale, New Jersey, 1991. (Cité page 80.)
- Morais, J. *L'art de lire*. Odile Jacob, Paris, 1994. (Cité pages 18, 19, 23, 79, 80 et 82.)
- Morris, R. D., Shaywitz, B. A., Shanweiler, D. P., Katz, L., Stuebing, K. K., Fletcher, J. M., et al. Subtypes of Reading Disability : Variability Around a Phonological Core. *Journal of Educational Psychology*, 90 :347–373, 1998. (Cité page 85.)
- Morton, J. et Patterson, K. E. A new attempt at an interpretation, or an attempt at a new interpretation. Dans Coltheart, M., P. J. et Marshall, J., éditeurs, *Deep dyslexia*. Routledge and Keagan Paul, London, 1980. (Cité pages 8 et 39.)
- Mozer, M. Early parallel processing in reading : A connectionist approach. Dans Coltheart, M., éditeur, *Attention and performance XII : The psychology of reading*, pages 83–104. Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1987. (Cité pages 25 et 26.)
- Mummery, C. J., Ashburner, J., Scott, S. K., et Wise, R. J. Functional neuroimaging of speech perception in six normal and two aphasic subjects. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106 :449–457, Jul 1999. (Cité page 63.)
- Musso, M., Moro, A., Glauche, V., Rijntjes, M., Reichenbach, J., Büchel, C., et Weiller, C. Broca's area and the language instinct. *Nat. Neurosci.*, 6 :774–781, Jul 2003. (Cité page 66.)
- Myklebust, H. *Progress in learning disabilities*. Grune and Stratton, New York, 1968. (Cité page 83.)
- Nazir, T. A. On the role of refixations in letter strings : the influence of oculomotor factors. *Percept Psychophys*, 49 :373–389, Apr 1991. (Cité pages 34 et 157.)
- Nazir, T. A., Heller, D., et Sussmann, C. Letter visibility and word recognition : the optimal viewing position in printed words. *Percept Psychophys*, 52 :315–328, Sep 1992. (Cité pages 32, 34 et 157.)
- Nazir, T. A., Jacobs, A. M., et O'Regan, J. K. Letter legibility and visual word recognition. *Mem Cognit*, 26 :810–821, Jul 1998. (Cité pages 33, 34 et 157.)

- Nazir, T. Traces of print along the visual pathway. Dans Kennedy, A., Radach, R., Heller, D., et Pynte, J., éditeurs, *Reading as a perceptual process*, pages 3–22. Elsevier, Amsterdam, 2000. (Cité page 34.)
- New, B., Ferrand, L., Pallier, C., et Brysbaert, M. Reexamining the word length effect in visual word recognition : new evidence from the English Lexicon Project. *Psychon Bull Rev*, 13 :45–52, Feb 2006. (Cité page 26.)
- Nicolson, R. I. et Fawcett, A. J. Automaticity : a new framework for dyslexia research ? *Cognition*, 35 :159–182, May 1990. (Cité page 103.)
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., et Dean, P. Time estimation deficits in developmental dyslexia : evidence of cerebellar involvement. *Proc. Biol. Sci.*, 259 :43–47, Jan 1995. (Cité page 102.)
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., et Dean, P. Developmental dyslexia : the cerebellar deficit hypothesis. *Trends Neurosci.*, 24 :508–511, Sep 2001. (Cité pages 103 et 111.)
- Nittrouer, S. Do temporal processing deficits cause phonological processing problems ? *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 42 :925–942, Aug 1999. (Cité page 93.)
- Nordlund, M. L., Rizvi, T. A., Brannan, C. I., et Ratner, N. Neurofibromin expression and astrogliosis in neurofibromatosis (type 1) brains. *J. Neuropathol. Exp. Neurol.*, 54 :588–600, Jul 1995. (Cité page 115.)
- North, K. Neurofibromatosis type 1. *Am. J. Med. Genet.*, 97 :119–127, 2000. (Cité pages 117 et 118.)
- North, K., Hyman, S., et Barton, B. Cognitive deficits in neurofibromatosis 1. *J. Child Neurol.*, 17 :605–612, Aug 2002. (Cité page 119.)
- North, K., Joy, P., Yuille, D., Cocks, N., Mobbs, E., Hutchins, P., McHugh, K., et de Silva, M. Specific learning disability in children with neurofibromatosis type 1 : significance of MRI abnormalities. *Neurology*, 44 :878–883, May 1994. (Cité page 119.)
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., et Alho, K. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing : a review. *Clin Neurophysiol*, 118 :2544–2590, Dec 2007. (Cité page 71.)

- Näätänen, R., Teder, W., Alho, K., et Lavikainen, J. Auditory attention and selective input modulation : a topographical ERP study. *Neuroreport*, 3 :493–496, Jun 1992. (Cité page 72.)
- Observatoire national de la lecture. *Apprendre à lire*. Editions Odile Jacob, Paris, 1998. (Cité pages 82, 84 et 85.)
- O'Regan, J. K., Lévy-Schoen, A., Pynte, J., et Brugaillère, B. Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 10 :250–257, Apr 1984. (Cité pages 32 et 33.)
- O'Regan, J. Eye movements and reading. Dans Kowler, E., éditeur, *Eye movements and their role in visual and cognitive processes*, pages 395–453. Academic Press, New York, 1990. (Cité page 32.)
- O'Regan, J. et Lévy-Schoen, A. Les mouvements des yeux au cours de la lecture. *L'année Psychologique*, 78 :459–492, 1978. (Cité pages 7 et 30.)
- Osaka, N. Effect of peripheral visual field size upon eye movements during japanese text processing. Dans O'Regan, J. et Lévy-Schoen, A., éditeurs, *Eye movement : From physiology to cognition*, pages 313–321. Elsevier Science, Amsterdam, 1987. (Cité page 31.)
- Ozonoff, S. Cognitive impairment in neurofibromatosis type 1. *Am. J. Med. Genet.*, 89 :45–52, Mar 1999. (Cité pages 117 et 118.)
- Paap, K. R., Newsome, S. L., McDonald, J. E., et Schvaneveldt, R. W. An activation–verification model for letter and word recognition : the word-superiority effect. *Psychol Rev*, 89 :573–594, Sep 1982. (Cité pages 19, 22, 23 et 37.)
- Paap, K. R., Newsome, S. L., et Noel, R. W. Word shape's in poor shape for the race to the lexicon. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 10 :413–428, Jun 1984. (Cité pages 19 et 20.)
- Pammer, K., Hansen, P. C., Kringelbach, M. L., Holliday, I., Barnes, G., Hillebrand, A., Singh, K. D., et Cornelissen, P. L. Visual word recognition : the first half second. *Neuroimage*, 22 :1819–1825, Aug 2004. (Cité pages 66, 70, 71 et 161.)
- Paracchini, S., Thomas, A., Castro, S., Lai, C., Paramasivam, M., Wang, Y., Keating, B. J., Taylor, J. M., Hacking, D. F., Scerri, T., Francks, C., Richardson, A. J., Wade-Martins, R., Stein, J. F., Knight, J. C., Copp, A. J., Loturco, J., et Monaco, A. P. The

- chromosome 6p22 haplotype associated with dyslexia reduces the expression of KIAA0319, a novel gene involved in neuronal migration. *Hum. Mol. Genet.*, 15 : 1659–1666, May 2006. (Cité page 113.)
- Patterson, K. et Hodges, J. R. Deterioration of word meaning : implications for reading. *Neuropsychologia*, 30 :1025–1040, Dec 1992. (Cité page 52.)
- Paulesu, E., Démonet, J., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., Cappa, S., Cossu, G., Habib, M., Frith, C., et Frith, U. Dyslexia : cultural diversity and biological unity. *Science*, 291 :2165–2167, Mar 2001. (Cité page 109.)
- Paulesu, E., Frith, C. D., et Frackowiak, R. S. The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362 :342–345, Mar 1993. (Cité pages 62, 63 et 110.)
- Paulesu, E., Frith, U., Snowling, M., Gallagher, A., Morton, J., Frackowiak, R. S., et Frith, C. D. Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? Evidence from PET scanning. *Brain*, 119 ( Pt 1) :143–157, Feb 1996. (Cité page 109.)
- Peressotti, F. et Grainger, J. The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Percept Psychophys*, 61 :691–706, May 1999. (Cité pages 24 et 34.)
- Pernet, C., Celsis, P., et Démonet, J. F. Selective response to letter categorization within the left fusiform gyrus. *Neuroimage*, 28 :738–744, Nov 2005. (Cité pages 60 et 156.)
- Perry, C., Ziegler, J. C., et Zorzi, M. Nested incremental modeling in the development of computational theories : the CDP+ model of reading aloud. *Psychol Rev*, 114 :273–315, Apr 2007. (Cité pages 8, 43, 46 et 47.)
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., et Raichle, M. E. Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331 :585–589, Feb 1988. (Cité pages 59, 65 et 69.)
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. Z., et Raichle, M. E. Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science*, 249 : 1041–1044, Aug 1990. (Cité page 70.)
- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., Miller, G. A., Ritter, W., Ruchkin, D. S., Rugg, M. D., et Taylor, M. J. Guidelines for

- using human event-related potentials to study cognition : recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37 :127–152, Mar 2000. (Cité pages 135, 137 et 145.)
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., et Patterson, K. Understanding normal and impaired word reading : computational principles in quasi-regular domains. *Psychol Rev*, 103 :56–115, Jan 1996. (Cité pages 25 et 45.)
- Polich, J. Normal variation of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 65 :236–240, May 1986. (Cité pages 72, 161 et 183.)
- Polich, J. et Donchin, E. P300 and the word frequency effect. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 70 :33–45, Jul 1988. (Cité pages 71 et 161.)
- Polich, J. et Kok, A. Cognitive and biological determinants of P300 : an integrative review. *Biol Psychol*, 41 :103–146, Oct 1995. (Cité pages 72 et 162.)
- Polk, T. A., Stallcup, M., Aguirre, G. K., Alsop, D. C., D'Esposito, M., Detre, J. A., et Farah, M. J. Neural specialization for letter recognition. *J Cogn Neurosci*, 14 :145–159, Feb 2002. (Cité page 70.)
- Posner, M. I., Abdullaev, Y. G., McCandliss, B. D., et Sereno, S. C. Neuroanatomy, circuitry and plasticity of word reading. *Neuroreport*, 10 :12–23, Feb 1999. (Cité page 68.)
- Posner, M. *Chronometric explorations of the mind*. Oxford University Press, New York, 1986. (Cité page 67.)
- Price, C. J. The anatomy of language : contributions from functional neuroimaging. *J. Anat.*, 197 Pt 3 :335–359, Oct 2000. (Cité page 63.)
- Price, C. J. et Friston, K. J. The temporal dynamics of reading : a PET study. *Proc. Biol. Sci.*, 264 :1785–1791, Dec 1997. (Cité page 59.)
- Price, C. J. et Mechelli, A. Reading and reading disturbance. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 15 :231–238, Apr 2005. (Cité page 53.)
- Price, C. J., Moore, C. J., et Frackowiak, R. S. The effect of varying stimulus rate and duration on brain activity during reading. *Neuroimage*, 3 :40–52, Feb 1996. (Cité pages 59, 65 et 69.)

- Price, C. J., Winterburn, D., Giraud, A. L., Moore, C. J., et Noppeney, U. Cortical localisation of the visual and auditory word form areas : a reconsideration of the evidence. *Brain Lang*, 86 :272–286, Aug 2003. (Cité pages 62 et 64.)
- Proverbio, A. M. et Adorni, R. Orthographic familiarity, phonological legality and number of orthographic neighbours affect the onset of ERP lexical effects. *Behav Brain Funct*, 4 :27, 2008. (Cité pages 68 et 71.)
- Proverbio, A. M., Cok, B., et Zani, A. Electrophysiological measures of language processing in bilinguals. *J Cogn Neurosci*, 14 :994–1017, Oct 2002. (Cité pages 69, 70, 71 et 161.)
- Proverbio, A. M., Vecchi, L., et Zani, A. From orthography to phonetics : ERP measures of grapheme-to-phoneme conversion mechanisms in reading. *J Cogn Neurosci*, 16 :301–317, Mar 2004. (Cité pages 68, 69, 71 et 161.)
- Proverbio, A. M. et Zani, A. Time course of brain activation during graphemic/phonologic processing in reading : an ERP study. *Brain Lang*, 87 :412–420, Dec 2003. (Cité pages 68, 69, 71 et 124.)
- Raichle, M. E., Fiez, J. A., Videen, T. O., MacLeod, A. M., Pardo, J. V., Fox, P. T., et Petersen, S. E. Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cereb. Cortex*, 4 :8–26, 1994. (Cité page 73.)
- Ramus, F. Developmental dyslexia : specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction ? *Curr. Opin. Neurobiol.*, 13 :212–218, Apr 2003. (Cité page 92.)
- Ramus, F. Neurobiology of dyslexia : a reinterpretation of the data. *Trends Neurosci.*, 27 :720–726, Dec 2004. (Cité page 114.)
- Ramus, F. Génétique de la dyslexie développementale. *A.N.A.E.*, 97-98 :9–14, 2008. (Cité pages 112 et 114.)
- Ramus, F., Pidgeon, E., et Frith, U. The relationship between motor control and phonology in dyslexic children. *J Child Psychol Psychiatry*, 44 :712–722, Jul 2003. (Cité pages 91, 93, 103 et 107.)
- Ramus, F. et Szenkovits, G. What phonological deficit ? *Q J Exp Psychol (Colchester)*, 61 :129–141, Jan 2008. (Cité page 91.)
- Rayner, K. Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychol Bull*, 124 :372–422, Nov 1998. (Cité pages 28 et 32.)



- Reed, M. A. Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *J Exp Child Psychol*, 48 :270–292, Oct 1989. (Cité page 93.)
- Reicher, G. M. Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *J Exp Psychol*, 81 :275–280, Aug 1969. (Cité pages 8 et 35.)
- Rey, V., De Martino, S., Espesser, R., et Habib, M. Temporal processing and phonological impairment in dyslexia : effect of phoneme lengthening on order judgment of two consonants. *Brain Lang*, 80 :576–591, Mar 2002. (Cité page 105.)
- Robichon, F. et Habib, M. Abnormal callosal morphology in male adult dyslexics : relationships to handedness and phonological abilities. *Brain Lang*, 62 :127–146, Mar 1998. (Cité page 108.)
- Rodriguez-Fornells, A., Rotte, M., Heinze, H. J., Nösselt, T., et Münte, T. F. Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain. *Nature*, 415 :1026–1029, Feb 2002. (Cité page 71.)
- Rosen, S. et Manganari, E. Is there a relationship between speech and nonspeech auditory processing in children with dyslexia? *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 44 :720–736, Aug 2001. (Cité pages 93 et 94.)
- Rossion, B., Joyce, C. A., Cottrell, G. W., et Tarr, M. J. Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage*, 20 :1609–1624, Nov 2003. (Cité pages 69, 159 et 160.)
- Roux, F. E., Lubrano, V., Lauwers-Cances, V., Trémoulet, M., Mascott, C. R., et Démonet, J. F. Intra-operative mapping of cortical areas involved in reading in mono- and bilingual patients. *Brain*, 127 :1796–1810, Aug 2004. (Cité page 65.)
- Rubenstein, H., Garfield, L., et Millikan, J. Homographic entries in the internal lexicon. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 9 :487–494, 1970. (Cité page 67.)
- Rubia, K. et Smith, A. The neural correlates of cognitive time management : a review. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*, 64 :329–340, 2004. (Cité page 106.)
- Rudell, A. P. et Hua, J. The recognition potential, word difficulty, and individual reading ability : on using event-related potentials to study perception. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23 :1170–1195, Aug 1997. (Cité page 72.)

- Ruff, S., Cardebat, D., Marie, N., et Démonet, J. F. Enhanced response of the left frontal cortex to slowed down speech in dyslexia : an fMRI study. *Neuroreport*, 13 :1285–1289, Jul 2002. (Cité pages 95, 110 et 111.)
- Rugg MDD, M. C. Melan, C. An ERP study of the effects of within and across-modality word repetition. *Language and Cognitive Processes*, 8 :337–640, 1993. (Cité page 137.)
- Rumelhart, D. E. et McClelland, J. L. An interactive activation model of context effects in letter perception : Part 2. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychol Rev*, 89 :60–94, Jan 1982. (Cité page 36.)
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K., Maisog, J. M., et Andreason, P. Phonological and orthographic components of word recognition. A PET-rCBF study. *Brain*, 120 ( Pt 5) :739–759, May 1997. (Cité pages 65 et 109.)
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K. L., Maisog, J. M., et Andreason, P. A functional lesion in developmental dyslexia : left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain Lang*, 70 :187–204, Nov 1999. (Cité page 109.)
- Salmelin, R., Helenius, P., et Service, E. Neurophysiology of fluent and impaired reading : a magnetoencephalographic approach. *J Clin Neurophysiol*, 17 :163–174, Mar 2000. (Cité page 69.)
- Salmelin, R., Service, E., Kiesilä, P., Uutela, K., et Salonen, O. Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Ann. Neurol.*, 40 :157–162, Aug 1996. (Cité pages 71, 109, 110 et 161.)
- Samson, Y., Belin, P., Thivard, L., Boddaert, N., Crozier, S., et Zilbovicius, M. [Auditory perception and language : functional imaging of speech sensitive auditory cortex]. *Rev. Neurol. (Paris)*, 157 :837–846, Sep 2001. (Cité page 61.)
- Sanders, A. F. et Houtmans, M. J. There is no central stimulus encoding during saccadic eye shifts : a case against general parallel processing notions. *Acta Psychol (Amst)*, 60 :323–338, Dec 1985. (Cité page 28.)
- Saron, C. D. et Davidson, R. J. Visual evoked potential measures of interhemispheric transfer time in humans. *Behav. Neurosci.*, 103 :1115–1138, Oct 1989. (Cité pages 153 et 162.)

- Sauseng, P., Bergmann, J., et Wimmer, H. When does the brain register deviances from standard word spellings?—An ERP study. *Brain Res Cogn Brain Res*, 20 : 529–532, Aug 2004. (Cité page 72.)
- Scarborough, H. Early identification of children at risk for reading disabilities. Phonological awareness and some other promising, predictors. Dans Shapiro, B., Accrardo, P., et Capute, A., éditeurs, *Specific reading disability : A view of the spectrum*. York Press, New York, 1998. (Cité page 92.)
- Schrimsher, G. W., Billingsley, R. L., Slopis, J. M., et Moore, B. D. Visual-spatial performance deficits in children with neurofibromatosis type-1. *Am. J. Med. Genet. A*, 120A :326–330, Jul 2003. (Cité page 118.)
- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., et Remschmidt, H. Role of auditory temporal processing for reading and spelling disability. *Percept Mot Skills*, 86 : 1043–1047, Jun 1998. (Cité page 93.)
- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., et Remschmidt, H. Pre-attentive processing of auditory patterns in dyslexic human subjects. *Neurosci. Lett.*, 276 :41–44, Nov 1999. (Cité pages 93 et 94.)
- Seidenberg, M. S. et McClelland, J. L. A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev*, 96 :523–568, Oct 1989. (Cité pages 25, 42 et 44.)
- Seidenberg, M. S., Waters, G. S., Sanders, M., et Langer, P. Pre- and postlexical loci of contextual effects on word recognition. *Mem Cognit*, 12 :315–328, Jul 1984. (Cité page 43.)
- Selfridge, O. et Neisser, U. Pattern recognition by machine. *Scientific American*, 203 :60–68, 1960. (Cité pages 7, 21 et 22.)
- Sereno, S. C., Brewer, C. C., et O'Donnell, P. J. Context effects in word recognition : evidence for early interactive processing. *Psychol Sci*, 14 :328–333, Jul 2003. (Cité pages 70 et 160.)
- Sereno, S. C. et Rayner, K. Spelling-sound regularity effects on eye fixations in reading. *Percept Psychophys*, 62 :402–409, Feb 2000. (Cité page 68.)
- Sereno, S. C., Rayner, K., et Posner, M. I. Establishing a time-line of word recognition : evidence from eye movements and event-related potentials. *Neuroreport*, 9 : 2195–2200, Jul 1998. (Cité pages 70, 71 et 161.)

- Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carré, R., et Demonet, J. F. Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 44 :384–399, Apr 2001. (Cité pages 93 et 94.)
- Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., et Sprenger-Charolles, L. Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *J Exp Child Psychol*, 87 :336–361, Apr 2004. (Cité page 94.)
- Seymour, P. Cognitive descriptions of dyslexia. Dans Pavlidis, G., éditeur, *Perspectives on dyslexia*. John Willey and sons, London, 1990. (Cité page 83.)
- Seymour, P. et Elder, L. Beginning reading without phonology. *Cognitive Neuropsychology*, 3 :1–37, 1986. (Cité page 77.)
- Shapley, R. et Perry, V. Cat and monkey retinal ganglion cells and their visual functional roles. *Trends in Neurosciences*, 9 :229–235, 1986. (Cité page 96.)
- Share, D., Jorm, A., Maclean, R., et Matthews, R. Temporal processing and reading disability. *Reading and Writing. An Interdisciplinary Journal*, 15 :151–178, 2002. (Cité pages 93 et 105.)
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Mencl, W. E., Constable, R. T., Pugh, K. R., Holahan, J. M., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R., et Gore, J. C. Neural systems for compensation and persistence : young adult outcome of childhood reading disability. *Biol. Psychiatry*, 54 :25–33, Jul 2003. (Cité pages 109 et 110.)
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W. E., Shankweiler, D. P., Liberman, A. M., Skudlarski, P., Fletcher, J. M., Katz, L., Marchione, K. E., Lacadie, C., Gatenby, C., et Gore, J. C. Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 95 :2636–2641, Mar 1998. (Cité page 110.)
- Silani, G., Frith, U., Demonet, J. F., Fazio, F., Perani, D., Price, C., Frith, C. D., et Paulesu, E. Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia : a voxel based morphometry study. *Brain*, 128 :2453–2461, Oct 2005. (Cité page 108.)
- Simon, G., Bernard, C., Largy, P., Lalonde, R., et Rebai, M. Chronometry of visual word recognition during passive and lexical decision tasks : an ERP investigation. *Int. J. Neurosci.*, 114 :1401–1432, Nov 2004. (Cité page 159.)

- Skottun, B. C. The magnocellular deficit theory of dyslexia : the evidence from contrast sensitivity. *Vision Res.*, 40 :111–127, 2000. (Cité page 97.)
- Smith, F. Familiarity of configuration vs. discriminability of features in the visual identification of words. *Psychonomic science*, 14 :261–262, 1969. (Cité page 19.)
- Snowling, M. *Dyslexia*. Blackwell, Oxford, 2nd édition, 2000. (Cité page 91.)
- Spinelli, D., Angelelli, P., De Luca, M., Di Pace, E., Judica, A., et Zoccolotti, P. Developmental surface dyslexia is not associated with deficits in the transient visual system. *Neuroreport*, 8 :1807–1812, May 1997. (Cité page 98.)
- Sprenger-Charolles, L. et Serniclaes, W. Reliability of phonological and surface subtypes in developmental dyslexia : A Review of Five Multiple Case Studies. *Current psychological letter. Behavior, Brain and Cognition*, 1, 2003. (Cité page 86.)
- Sprenger-Charolles, L., Serniclaes, W., et Colé, P. *Reading acquisition and developmental dyslexia*. Psychology Press, Hove, 2006. (Cité page 80.)
- Stein, J. Visual motion sensitivity and reading. *Neuropsychologia*, 41 :1785–1793, 2003. (Cité page 98.)
- Stein, J., Talcott, J., et Walsh, V. Controversy about the visual magnocellular deficit in developmental dyslexics. *Trends Cogn. Sci. (Regul. Ed.)*, 4 :209–211, Jun 2000. (Cité page 98.)
- Stein, J. et Walsh, V. To see but not to read ; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends Neurosci.*, 20 :147–152, Apr 1997. (Cité pages 97 et 103.)
- Stephenson, S. Six cases of congenital word-blindness affecting three generations of one family. *Ophthalmoscope*, 5 :482–484, 1907. (Cité page 111.)
- Stevens, M. et Grainger, J. Letter visibility and the viewing position effect in visual word recognition. *Percept Psychophys*, 65 :133–151, Jan 2003. (Cité pages 25 et 34.)
- Stone, J., Leicester, J., et Sherman, S. M. The naso-temporal division of the monkey's retina. *J. Comp. Neurol.*, 150 :333–348, Aug 1973. (Cité page 162.)
- Stoodley, C. J., Talcott, J. B., Carter, E. L., Witton, C., et Stein, J. F. Selective deficits of vibrotactile sensitivity in dyslexic readers. *Neurosci. Lett.*, 295 :13–16, Dec 2000. (Cité page 106.)

- Stuart, M. et Coltheart, M. Does reading develop in a sequence of stages ? *Cognition*, 30 :139–181, Nov 1988. (Cité page 77.)
- Studdert-Kennedy, M. et Mody, M. Auditory temporal perception deficits in the reading impaired : A critical review of the evidence. *Psychonomic Bulletin*, 2 : 508–514, 1995. (Cité pages 93 et 105.)
- Taipale, M., Kaminen, N., Nopola-Hemmi, J., Haltia, T., Myllyluoma, B., Lyytinen, H., Muller, K., Kaaranen, M., Lindsberg, P. J., Hannula-Jouppi, K., et Kere, J. A candidate gene for developmental dyslexia encodes a nuclear tetratricopeptide repeat domain protein dynamically regulated in brain. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 100 :11553–11558, Sep 2003. (Cité page 113.)
- Tallal, P. Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain Lang*, 9 :182–198, Mar 1980. (Cité pages 92 et 104.)
- Tallal, P. et Piercy, M. Defects of non-verbal auditory perception in children with developmental aphasia. *Nature*, 241 :468–469, Feb 1973. (Cité page 92.)
- Tallal, P., Stark, R. E., et Mellits, E. D. Identification of language-impaired children on the basis of rapid perception and production skills. *Brain Lang*, 25 :314–322, Jul 1985. (Cité page 106.)
- Tarkiainen, A., Cornelissen, P. L., et Salmelin, R. Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception. *Brain*, 125 : 1125–1136, May 2002. (Cité page 69.)
- Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L., et Salmelin, R. Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122 ( Pt 11) :2119–2132, Nov 1999. (Cité pages 59, 69, 71 et 161.)
- Temple, E., Poldrack, R. A., Protopapas, A., Nagarajan, S., Salz, T., Tallal, P., Merzenich, M. M., et Gabrieli, J. D. Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia : evidence from functional MRI. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 97 :13907–13912, Dec 2000. (Cité page 111.)
- Temple, E., Poldrack, R. A., Salidis, J., Deutsch, G. K., Tallal, P., Merzenich, M. M., et Gabrieli, J. D. Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children : an fMRI study. *Neuroreport*, 12 :299–307, Feb 2001. (Cité page 109.)

- Thierry, G., Cardebat, D., et Démonet, J. F. Electrophysiological comparison of grammatical processing and semantic processing of single spoken nouns. *Brain Res Cogn Brain Res*, 17 :535–547, Oct 2003a. (Cité page 72.)
- Thierry, G., Doyon, B., et Démonet, J. F. ERP mapping in phonological and lexical semantic monitoring tasks : A study complementing previous PET results. *Neuroimage*, 8 :391–408, Nov 1998. (Cité page 72.)
- Thierry, G., Ibarrola, D., Démonet, J. F., et Cardebat, D. Demand on verbal working memory delays haemodynamic response in the inferior prefrontal cortex. *Hum Brain Mapp*, 19 :37–46, May 2003b. (Cité page 72.)
- Thompson-Schill, S. L., D'Esposito, M., Aguirre, G. K., et Farah, M. J. Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge : a reevaluation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 94 :14792–14797, Dec 1997. (Cité page 66.)
- Townsend, J., Taylor, S., et Brown, D. Lateral masking for letters with unlimited viewing time. *Percept Psychophys*, 10 :375–378, 1971. (Cité page 156.)
- Trauzettel-Klosinski, S. et Reinhard, J. The vertical field border in hemianopsia and its significance for fixation and reading. *Invest Ophthalm & Visual Sc*, 39 : 2177–2186, 1998. (Cité page 162.)
- Tyler, L. K., Bright, P., Fletcher, P., et Stamatakis, E. A. Neural processing of nouns and verbs : the role of inflectional morphology. *Neuropsychologia*, 42 :512–523, 2004. (Cité page 66.)
- Valdois, S. Les grandes étapes de l'apprentissage. Dans Van Hout, A. et Estienne, F., éditeurs, *Les dyslexies : décrire, évaluer, expliquer, traiter*. Masson, Paris, 1998. (Cité page 79.)
- Valdois, S., Bosse, M. L., et Tainturier, M. J. The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia : review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, 10 :339–363, Nov 2004. (Cité pages 84, 101, 143 et 144.)
- Valdois, S., Bosse, M., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., et Pellat, J. Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia : Evidence from two case studies. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 16 :541–572, 2003. (Cité page 101.)

- Van Hout, A. et Estienne, F. *Les dyslexies*. Editions OIL, Paris, 2001. (Cité pages 87 et 88.)
- Vandenberghe, R., Price, C., Wise, R., Josephs, O., et Frackowiak, R. S. Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature*, 383 : 254–256, Sep 1996. (Cité page 65.)
- VanRullen, R. et Thorpe, S. J. The time course of visual processing : from early perception to decision-making. *J Cogn Neurosci*, 13 :454–461, May 2001. (Cité page 69.)
- Vitu, F. Against the existence of a range effect during reading. *Vision Res.*, 31 : 2009–2015, 1991a. (Cité page 33.)
- Vitu, F. The existence of a center of gravity effect during reading. *Vision Res.*, 31 : 1289–1313, 1991b. (Cité page 33.)
- Vitu, F. The influence of parafoveal preprocessing and linguistic context on the optimal landing position effect. *Percept Psychophys*, 50 :58–75, Jul 1991c. (Cité page 33.)
- Vitu, F., O'Regan, J. K., et Mittau, M. Optimal landing position in reading isolated words and continuous text. *Percept Psychophys*, 47 :583–600, Jun 1990. (Cité page 33.)
- von Plessen, K., Lundervold, A., Duta, N., Heiervang, E., Klauschen, F., Smievoll, A. I., Ersland, L., et Hugdahl, K. Less developed corpus callosum in dyslexic subjects—a structural MRI study. *Neuropsychologia*, 40 :1035–1044, 2002. (Cité page 109.)
- Walker, M. M., Shinn, J. B., Cranford, J. L., Givens, G. D., et Holbert, D. Auditory temporal processing performance of young adults with reading disorders. *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 45 :598–605, Jun 2002. (Cité page 106.)
- Wang, Y., Paramasivam, M., Thomas, A., Bai, J., Kaminen-Ahola, N., Kere, J., Voskuil, J., Rosen, G. D., Galaburda, A. M., et Loturco, J. J. DYX1C1 functions in neuronal migration in developing neocortex. *Neuroscience*, 143 :515–522, Dec 2006. (Cité page 113.)
- Watt, S. E., Shores, A., et North, K. N. An examination of lexical and sublexical reading skills in children with neurofibromatosis type 1. *Child Neuropsychol*, 14 : 401–418, Sep 2008. (Cité page 119.)



- Wechsler, D. *Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents* (4ème édition). Les éditions du centre de psychologie appliquée, Paris, 2005. (Cité page 141.)
- Wernicke, C. *Der aphasische symptomatenkomplex*. Breslau, Poland, 1874. (Cité page 50.)
- Wheeler, D. Processes in word recognition. *Cognitive Psychology*, 1 :59–85, 1970. (Cité pages 8, 19, 35 et 36.)
- White, S., Milne, E., Rosen, S., Hansen, P., Swettenham, J., Frith, U., et Ramus, F. The role of sensorimotor impairments in dyslexia : a multiple case study of dyslexic children. *Dev Sci*, 9 :237–255, May 2006. (Cité page 92.)
- Whitney, C. How the brain encodes the order of letters in a printed word : The SERIOL model and selective literature review. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8 :221–243, 2001. (Cité page 26.)
- Whitney, C. et Cornelissen, P. Letter-position encoding and dyslexia. *Journal of Research in Reading*, 28 :274–301, 2005. (Cité pages 102 et 157.)
- Wickens, C., Kramer, A., Vanasse, L., et Donchin, E. Performance of concurrent tasks : a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*, 221 :1080–1082, Sep 1983. (Cité pages 72 et 161.)
- Williams, J. et O'Donovan, M. C. The genetics of developmental dyslexia. *Eur. J. Hum. Genet.*, 14 :681–689, Jun 2006. (Cité page 113.)
- Wimmer, H., Landerl, K., Linortner, R., et Hummer, P. The relationship of phonemic awareness to reading acquisition : more consequence than precondition but still important. *Cognition*, 40 :219–249, Sep 1991. (Cité page 81.)
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., Stein, J. F., et Green, G. G. Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Curr. Biol.*, 8 :791–797, Jul 1998. (Cité pages 98 et 106.)
- Wolf, M., Bowers, P. G., et Biddle, K. Naming-speed processes, timing, and reading : a conceptual review. *J Learn Disabil*, 33 :387–407, 2000. (Cité page 91.)
- Zatorre, R. J., Meyer, E., Gjedde, A., et Evans, A. C. PET studies of phonetic processing of speech : review, replication, and reanalysis. *Cereb. Cortex*, 6 :21–30, 1996. (Cité page 62.)

- Zeffiro, T. et Eden, G. The cerebellum and dyslexia : perpetrator or innocent bystander ? *Trends Neurosci.*, 24 :512–513, Sep 2001. (Cité page 111.)
- Ziegler, J. C. et Goswami, U. Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages : a psycholinguistic grain size theory. *Psychol Bull*, 131 :3–29, Jan 2005. (Cité page 79.)
- Zorzi, M., Houghton, G., et Butterworth, B. Two routes or one in reading aloud ? A connectionist dual-process model. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24 :1131–1181, 1998. (Cité page 46.)

## ANNEXES

A



## A.1 LISTE DE STIMULI

	Mots	Non-mots
Position 1	doute/route range/mange lapin/sapin reine/peine ville/mille foule/poule ligne/signe belle/celle	pgsrf/cgsrf cxzgh/mxzgh cdqke/tdqke ixztc/exztc ewthv/owthv erjnl/arjnl dfrzj/lfrzj tdqke/cdqke
Position 2	pêche/poche laver/lever salon/selon jaune/jeune mains/moins piste/poste glace/grâce balle/bulle	wezgf/wizgf wspmg/wupmg kawdz/kewdz qixhv/qaxhv wupmg/wspmg qrthb/qithb kewdz/kawdz qeznj/qaznj
Position 3	santé/sauté poème/pomme fumée/fusée sable/salle notre/noire femme/ferme corps/coups tigre/titre	htled/htred zxebq/zxobq hgmcp/hgucp dqjnk/dqljk jdmrz/jdczr jdczr/jdmrz zxobq/zxebq lmpvf/lmrvf
Position 4	place/plage verre/verte douce/douze rouge/roule pluie/plume boire/boite forme/forte poids/poils	rtwad/rtwud fdxoh/fdxih qhkrn/qhkln sxmub/sxmib dgxib/dgxub rtwud/rtwad gpvtn/gpvun fdxih/fdxoh
Position 5	finir/finit aurai/auras passa/passe voilà/voile donna/donne jouer/joues train/trait radio/radis	gfdht/gfdhr kljqe/kljqu dfmgu/dfmgt pkvbt/pkvbu gvfln/gvfls gfdhr/gfdht dfmgt/dfmgu pkvbt/pkvbu

## A.2 RÉSULTATS DES ANALYSES DE RÉGRESSIONS

### A.2.1 Analyses de régression sur les pourcentages de bonnes réponses

	Normo-lecteurs		Dyslexiques	
	AC	AL	AC	AL
MP <sub>1</sub>	0.94	0.22	0.62	0.02*
MP <sub>2</sub>	0.29	<0.001*	0.43	0.006*
MP <sub>3</sub>	0.96	0.1	0.68	0.14
MP <sub>4</sub>	0.8	0.03*	0.02*	0.22
MP <sub>5</sub>	0.63	0.06	0.74	0.38
NMP <sub>1</sub>	0.64	0.82	0.1	<0.001*
NMP <sub>2</sub>	0.003*	0.004*	0.68	0.047*
NMP <sub>3</sub>	0.97	0.03*	0.05	0.89
NMP <sub>4</sub>	0.94	0.18	0.19	0.38
NMP <sub>5</sub>	0.7	0.36	0.35	0.13

### A.2.2 Analyses de régression sur les temps de réaction

	Normo-lecteurs		Dyslexiques	
	AC	AL	AC	AL
MP <sub>1</sub>	0.002*	0.03*	0.54	0.35
MP <sub>2</sub>	0.04*	0.51	0.38	0.53
MP <sub>3</sub>	0.02*	0.67	0.27	0.95
MP <sub>4</sub>	0.02*	0.55	0.14	0.69
MP <sub>5</sub>	0.003*	0.03*	0.11	0.47
NMP <sub>1</sub>	0.03*	0.06	0.1	0.82
NMP <sub>2</sub>	0.01*	0.08	0.23	0.82
NMP <sub>3</sub>	0.005*	0.04*	0.01*	0.55
NMP <sub>4</sub>	0.001*	<0.001*	0.15	0.99
NMP <sub>5</sub>	0.01*	0.13	0.21	0.81

A.3 ARTICLE : BEHAVIOURAL AND COGNITIVE PHENO-  
TYPES IN CHILDREN WITH NEUROFIBROMATOSIS TYPE  
1 (NF1) : THE LINK WITH THE NEUROBIOLOGICAL LE-  
VEL





## Lexicality effect in word identification : an event-related potential study in children with and without dyslexia

**Abstract** Reading is a common activity in our society. Since the last century, a lot of researchers have study the processes involved in written words identification. The work conducted during my thesis is in line with this framework. Orthographic processes that take place during visual recognition of letter sequences can be dissociated into three different stages activated in an interactive and parallel manner : visual feature analysis, letter processing and letter sequence processing. The lexical influences on letter identification have often been observed with the well-known Word Superiority Effect : a letter is better identified when presented in words than in non-words or in isolation. One aim of this study was to understand which processing stages are influenced by lexical knowledge during reading acquisition. To do this, we performed an Event-Related Potential study with dyslexic children and typically achieving ones. The task consists in identifying a letter presented in a word or a non-word. Furthermore, it is well accepted that, in alphabetic and left-to-right languages, words are better identified when fixated slightly left of the center. Our task was designed in such a way that we were able to study this Optimal Viewing Position. The aim was to analyse if the lexical influences intervene in the same manner for all position in the word. Our behavioral results show a Word Superiority Effect only for typically achieving children suggesting influences of the lexical knowledge for them. We hypothesise that dyslexics present a deficit on these "top-down" lexical influences. Analyses based on the position do not show the Optimal Viewing Position expected. The results are similar in both groups with a diminution of the performance between the first and the last position. It suggests a serial and automatic processing of the stimuli from left to right whatever the fixation point. The firsts ERPs differences between words and non-words appears on the N2 reflecting the lexical processing and the same effect is shown in both groups. The lack of effect on the N170 is in disagreement with the hypothesis of lexical influences on letter identification at a pre-lexical level. Finally, there is no difference between conditions (word vs. non-word) on the P300 arguing that attention is allocated in a similar way for words and non-words in both groups and that lexical categorisation is less automatic in children than in adults.





**AUTEUR :** Stéphanie IANNUZZI

**TITRE :** LES EFFETS LEXICAUX DANS L'IDENTIFICATION DE LETTRE : ÉTUDE EN POTENTIELS ÉVOQUÉS CHEZ DES ENFANTS CONTRÔLES ET DYSLEXIQUES.

**DIRECTEUR DE THÈSE :** Jean-François Démonet

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE :** Toulouse, le 17 décembre 2010

---

**RÉSUMÉ :** La lecture est une activité courante et quotidienne dans notre société. Depuis le siècle dernier, de nombreuses études se sont attachées à chercher quels étaient les mécanismes mis en place pour l'identification de mots écrits. La recherche menée durant ces 4 années de thèse s'inscrit dans ce cadre de travail. La reconnaissance visuelle de séquences de lettres implique un traitement orthographique qui peut être décomposé en trois phases activées en parallèle et de façon interactive : le traitement des traits visuels, le traitement des lettres et le traitement des séquences de lettres. L'influence des connaissances lexicales sur l'identification de lettres a souvent été mise en évidence par l'effet de supériorité du mot : une lettre étant mieux reconnue quand elle est présentée dans un mot que dans un non-mot ou isolément. L'un des objectifs de ce travail était de voir à quelle(s) phase(s) du traitement ces influences lexicales interviennent durant l'acquisition de la lecture. Pour ce faire, la technique des potentiels évoqués a été utilisée chez des enfants normo-lecteurs et dyslexiques dans une tâche d'identification de lettre présentée dans un mot ou un non-mot. Par ailleurs, il est admis par de nombreux auteurs que dans les langues alphabétiques et avec un sens de lecture de gauche à droite, les mots sont mieux reconnus quand ils sont fixés légèrement à gauche de leur centre. Cet effet de position optimale a également été étudié dans notre protocole afin de voir si les influences lexicales intervenaient quelque soit la position de la lettre dans le mot. Nos résultats comportementaux révèlent un effet de supériorité du mot uniquement chez les enfants normo-lecteurs reflétant l'intervention des connaissances lexicales. Nous postulons dès lors que les dyslexiques pourraient souffrir d'un déficit d'effet " top-down " lexical. Les analyses en fonction de la position ne montre pas l'effet de position optimale attendu. On observe des résultats similaires dans les deux groupes avec un gradient de performances diminuant de la première à la cinquième position qui pourrait s'expliquer par un traitement sériel et automatisé des stimuli de la gauche vers la droite et ce quelque soit le point de fixation. En potentiels évoqués, les premières différences entre mots et non-mots sont observées sur l'onde N2 reflétant le traitement lexical et elles s'observent pour les 2 groupes d'enfants. L'absence d'effet lexical sur l'onde N170

est en désaccord avec l'hypothèse d'une influence des représentations lexicales en mémoire sur l'identification de lettres à un niveau pré-lexical. Finalement, nous n'observons pas de différence entre les conditions 'mots' et 'non-mots' sur l'onde P300 soulignant que l'attention allouée pour ces 2 types de stimuli est similaire pour nos 2 groupes de sujets et que la catégorisation serait moins automatisée chez les enfants que chez les adultes.

---

**MOTS-CLÉS :** identification de lettre, dyslexie, enfants, potentiels évoqués, effet de position du regard, effet de lexicalité

---

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE :** Neuropsychologie

---

**ADRESSE DU LABORATOIRE :**

**Inserm U825**  
Pavillon Riser, CHU Purpan, F-31059 Toulouse Cedex 3